



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Maaehituse osakond

Kristo Karu

**KALDU SÜVISTATUD TERAS- JA KRUUVIVAIADE KÄITUMINE JA  
TÕMBEKANDEVÕIME**

**BEHAVIOUR AND TENSILE LOAD-CAPACITY OF INCLINED STEEL  
AND HELICAL PILES**

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendajad  
Lektor Villu Leppik  
Doktor Mait Mets

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kristo Karu		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Kaldu süvistatud teras- ja kruvivaiade käitumine ja tõmbekandevõime			
Lehekülgi: 97	Jooniseid: 88	Tabeleid: 43	Lisasid: 3
Osakond: Maaehituse osakond			
Uurimisvaldkond: Geotehnika			
Juhendaja(d): Villu Leppik, Mait Mets			
Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu 2017			
<p>Kruvivaiade käitumist on uuritud surve-, horisontaal- ja vertikaalkandevõimele, kuid on teadmata, kuidas kruvivai käitub teda nurga all välja tõmmates.</p> <p>Käesoleva magistritöö eesmärk on välja selgitada maapinna ja vaia vahelise nurga mõju tõmbekandevõimele.</p> <p>Nurga mõju tõmbekandevõimele välja selgitamiseks teostati laboratoorseid katseid. Katsekehad olid maa sees 75-kraadise ja 60-kraadise nurga all maapinna suhtes ning tõmbekoormust rakendati vertikaalselt hüdraulilise silindri abil.</p> <p>Katsetulemustest selgus, et 75-kraadise nurga all üksikvaiad ja vaiapaarid talusid suuremat tõmbekoormust kui 60-kraadise nurga all olevad üksikvaiad ja vaiapaarid.</p> <p>Katsetulemusi võrreldi ka Kuido Kanguri magistritöö „Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring“ tulemustega, kus töö autor uuris vertikaalsete katsevaiade tõmbekandevõimet. Tulemustest selgus, et 75-kraadise nurga all olevate vaiade tõmbekandevõime oli 20...50% suurem kui vertikaalsetel katsevaiadel.</p> <p>Kruvivaiade kasutamine nurga all tagab küll suurema tõmbekandevõime, kuid pole teada, kuidas selline vaia asetus mõjutab survekandevõimet. Samuti on maapinna ja vaia vahelise ideaalse nurga (nurk, kus piirkoormus on kõige suurem) välja selgitamiseks vajalikud edasised uurimised.</p>			
Märksõnad: kruvivai, vai, kruvivaivundament, tõmbekandevõime, liiv			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kristo Karu		Specialty: Civil Engineering	
Title: Behaviour and tensile load-capacity of inclined steel and helical piles			
Pages: 97	Figures: 88	Tables: 43	Appendixes: 3
Department: Department of Rural Building Field of research: Geotechnics Supervisors: Villu Leppik, Mait Mets Place and date: Tartu 2017			
<p>The behaviour of helical pile has been studied for vertical and horisontal load, but not when the subject has been driven into the soil diagonally.</p> <p>The aim of this thesis is to study the ramifications of installation of the helical pile under an angle, and how it effects load bearing under vertical tension.</p> <p>To determine the effect of an angularly installed helical pile, laboratory tests were carried out. Test subjects were driven into the ground under 60 and 75 degrees from the soil surface. Vertical tension was applied through hydraulic cylinder.</p> <p>The results of the experiments showed, that both one pile and a pair of piles perfomed better under 75 than 60 degrees.</p> <p>Test results were compared to masters thesis titled „The analysis of behavior and load bearing of short helical piles“ by Kuido Kangur. The author of the thesis analysed load bearing under tension, where same test subjects were driven into the soil vertically (90 degrees). Test results suggested that piles under 75 degrees were capable of enduring 20...50% more load than straight piles.</p> <p>Diagonally installed piles did conclude superior vertical capacity under tension, however, it is unknown how such pile placement affect compression capacity. Moreover further tests should be performed to figure out the optimal angle for best load bearing capacity.</p>			
Keywords: helical pile, screw-pile, helical pile foundation, uplift capacity, sand			

# SISUKORD

Sissejuhatus .....	5
1. Kirjanduse ülevaade .....	8
1.2. Vaivundamentidest .....	8
1.2. Kruvivaivundamentide ajaloost .....	9
1.2.1. Kruvivaivundamentide looja – Alexander Mitchell .....	10
1.2.2. Kruvivaiadele ehitatud tuletornid .....	10
1.2.3. Kruvivaiade kasutamine sildade ja kaide ehituses .....	11
1.3. Varasemad uurimustulemused .....	12
1.3.1. Kruvivaia horisontaalkandevõime .....	12
1.3.2. Kruvivaia/kruviankru vertikaalkandevõime .....	15
2. Katsete metoodika ja materjalid .....	25
2.1. Liivakasti pinnas .....	25
2.2. Katsekehad .....	26
2.3. Katseseadmed .....	27
2.3.1. Vaia tõmbeseade .....	27
2.3.2. Üksikvaia tõmbekatse skeem .....	28
2.3.3. Nurga all oleva kahe vaia tõmbekatse skeem .....	29
2.3.4. Kahe vertikaalse vaia tõmbekatse skeem .....	30
2.3.5. Katsetel kasutatud pinnasekast .....	31
2.4. Katsetel kasutatud koormamis- ja mõõtmisseadmed .....	31
2.5. Katseplaan .....	34
2.5.1. Vaiade süvistamine .....	35
2.5.2. Katsegrupid .....	36
3. Diskussioon ja tulemuste analüüs .....	37
3.1. Labadeta üksikvaiade katsetulemused .....	37

3.2. Labadega üksikvaiade katsetulemused .....	38
3.3. Vertikaalsete ja nurga all olevate vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus.....	39
3.4. Vaia arvutusliku kandevõime võrdlus katsetulemustega.....	44
3.5. Erinevate nurkade all olevate paarisvaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus .....	46
3.6. Nurga all oleva kahe vaia ja üksikvaia tõmbekatsete tulemuste võrdlus.....	49
3.7. Vertikaalsete vaiade erinevate vahekauguste tõmbekatsete tulemuste võrdlus.....	51
3.8. Väändevõtme ja vaia kandevõime vaheline seos.....	54
3.9. Katsete maapinna tõusu analüüs .....	55
3.10. Järeldused.....	59
Kokkuvõte .....	61
Summary.....	63
Kasutatud kirjandus .....	65
Lisad .....	67
Lisa 1. Vaia süvistamisel kasutatud abivahendid .....	67
Lisa 2. Katseprotokoll.....	68
Lisa 3. Pinnaseproovid.....	96

## SISSEJUHATUS

Kruvivaivundamentide alguslugu ulatub 19. sajandisse, mil kruvivaiu kasutati tuletornide vundamentides ning hiljem sadamakaide ja sildade vundamentide ehitusel. Tänu kruvivaiadele muutus ehitamine lihtsamaks, eriti kohtades, kus varem ehitada ei saanud.

Kruvivaiu nimetatakse tihti ka kruviankruteks, sest kruvivaia tüve alumise osa külge keevitatud laba fikseerib vaia pinnasesse. Kruvivaiaid töötavad lisaks surve- ja tõmbekandevõimele ka horisontaalkandevõimele, tagades seejuures väga väikese vundamendi omakaalu. Kruvivaivundamendi suurimaks eeliseks on vundamendi paigalduskiirus – vundamendi rajamiseks ei ole vaja kaevata kaevikuid ega oodata betooni kuivamist. Tänu vaivundamendi kiirele ja lihtsale paigaldusele on töödest tulenev surve keskkonnale väike. Kruvivaivundamenti on väga lihtne likvideerida ning rajada teise kohta.

Varasemalt on uuritud kruvivaiade tõmbe-, surve- ja horisontaalkandevõimet erinevates pinnastes. Välja on töötatud palju teooriad tõmbe- ning survekandevõime arvutamiseks, kuid paraku esineb nendes teooriates palju puudusi ja hälbeid. Kruvivaiade tõmbekandevõime ning pinnase deformatsioonide hindamiseks puudub usaldusväärne meetod ja seetõttu on kruvivaiade kasutusvaldkond küllaltki kitsas. Säästliku ja efektiivse katsemudeli välja töötamiseks on vajalikud edaspidised uurimused.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli püüda leida võimalusi kergete/ajutiste PVC hallide vundamentide lahendamisel. Teatavasti on kerged/ajutised PVC hallid tuulekoormusele väga tundlikud ning seetõttu on kruvivaiade kasutamine hallide vundamentides vägagi õigustatud. Kruvivaiu on lihtne ja kiire paigaldada ning nad töötavad lisaks surve- ja horisontaalkandevõimele ka tõmbekandevõimele. Uurimuse käigus uuriti varasemaid kruvivaiade tõmbekatsete meetodeid ja katsetulemusi, töötati välja katsemudel, sooritati 26 laboratoorset katset ning analüüsiti ja võrreldi tulemusi.

Esimene katsegrupp koosnes 10-st üksikvaia tõmbekatsest, kus vai oli maa sisse süvistatud 60-kraadise või 75-kraadise nurga alla maapinna suhtes. Antud katsegrupi eesmärgiks oli

uurida, kas vaia nurga all maa sisse süvistamine mõjutab tõmbekandevõimet võrreldes vertikaalsete kruvivaiadega. Paralleelselt käesoleva magistritööga teostati teise magistritöö raames katseid samade katsekehade, milles uuriti vaiade vertikaalset tõmbekandevõimet. Nimetatud uurimistöö autor on Kuido Kangur ning töö pealkiri „Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring“. Töö autori tehtud katsete tulemusi võrreldi käesolevas magistritöös nurga all olevate vaiade tõmbekatsete tulemustega.

Teine katsegrupp sisaldas kaheksat kahe vaiaga tõmbekatset, kus mõlemad vaiad olid 60-kraadise või 75-kraadise nurga all maapinna suhtes. Antud katsegrupi eesmärgiks oli uurida nurga mõju tõmbekandevõimele kahe vaia puhul ning võrrelda tulemusi üksikvaiade tõmbekatsete tulemustega.

Viimane grupp katseid koosnes vertikaalsete kruvivaiade tõmbekatsetest erinevate vahekauguste puhul. Eesmärgiks oli uurida, kas erinevad vaiade vahekaugused muudavad tõmbekandevõime tulemusi.

Seoses magistritöö kirjutamisega tänab töö autor oma juhendajaid ja Andres Kauri (AS MARU), kes varustas katsekehade ning katseseadmetega.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.2. Vaivundamentidest

Vaiaks nimetatakse pinnasesse süvistatud tugiposti, millega kantakse ehitise koormus üle pinnasesse. Üldjuhul kasutatakse vaivundamente nõrkadel aluspindadel ning veega kaetud aladel. Nende alumise osa saab viia maapinnast väga suurele sügavusele tugeva pinnasekihini kaevamata sügavaid süvendeid ning kaevikuid. Vaiade eesmärgiks pole ainult sügavasse pinnasekihti jõudmine, vaid nad võivad ka pinnast tihendada. Vaivundament koosneb tavaliselt üksikutest vaiadest, mille ülemised otsad on omavahel ühendatud plaadiga või taladega, nn rostvargiga. Tsiviil- ja tööstusehitiste puhul kasutatakse vaivundamente tänapäeval laialdaselt looduslikule aluspinnale ehitatud vundamentide (nn madalvundamentide) asemel. Keldrita hoonete puhul vähendab vaivundamentide kasutamine tülivate mullatööde mahtu 7,5...13 korda ning betoonitööde mahtu 1,5...2,5 korda. Vaivundamentide kasutamine vähendab eriti talve- ja linnatingimustes tehtavaid tööde mahtusid. Selle tulemusena võivad vundamentide maksumused alaneda 30...50% võrra. [1]

Vaiu liigitatakse järgmiselt [1]:

- materjali järgi: teras-, betoon-, puit-, raudbetoon- ning kombineeritud vaiad;
- ristlõike järgi: ümara-, hulknurksed, lahtise profiiliga, kinnise profiiliga, ruudu- ja ristkülikukujulised, õõnes- ja toruvaiad;
- pikilõike järgi: koonilised, silindrilised, teleskoopilised ja suurendatud kannaga vaiad;
- süvistamismeetodi järgi: ramm-, koht-, kruvivaiad.

Käesoleva magistritöö eksperimentaalsetes katsetes kasutati lühikesi terasest ramm- ja kruvivaiu. Kruvivaiad erinevad teistest vaiadest tööpõhimõtte poolest, neil on oma väikese kaalu juures väga suur tõmbekandevõime. Kruvivaivundamentide põhilised eelised teiste vaivundamentide ees:

- Kruvivai pakub lisaks surve- ja horisontaalkandevõimele ka tõmbekandevõimet.



- Vaivundamenti on võimalik väga lihtsalt likvideerida ning rajada teise kohta.
- Vundamendi süvistamisel ei teki vibratsiooni ega müra.
- Vundamendi keskkonna mõju on väike.
- Kruvivaivundamente on võimalik paigaldada raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse.
- Neid saab kasutada ja paigaldada kohtades, kus on kõrge pinnasevee tase.

Tänapäeval leiavad kruvivaivundamendid kasutust paadisildade, hallide, suvilate, hoonete juurdeehituste, treppide, platvormide, kergemate eluhoonete ja paljude teiste välirajatiste juures.

## 1.2. Kruvivaivundamentide ajaloo

Kruvivaivundamendid olid 19. sajandi keskpaigas ühed globaalselt olulised uuendused. Kruvivaiad tegid tuleornide ehituse võimalikuks kohtadesse, kus areng oleks muidu kahtlemata seisnud. Tänu kruvivaiadele sai võimalikuks sildade rajamine kohtadesse, kuhu poleks ilmselt veel 40 aastat midagi ehitatud. Vaiad leidsid kasutust avamere kaide ehitusel, mis omakorda andis panuse tööstuse kiiremasse arengusse. Kruvivaiade kasutamine ehituses oli tol perioodil nii tavapärane ja enesestmõistetav, et seda ei peetud märkimisväärseks insenertehniliseks lahenduseks. Detailne tehniline kirjandus kruvivaiade kohta 19. sajandist sisuliselt puudub. Kuigi ajalooline insenertehniline kirjandus on puudulik, on piisavalt kollektiivset informatsiooni, et tagada detailne info nende paigaldamise kohta sellel perioodil. [2]

Kruvivaiu kasutati suuremahulistel insenerobjektidel, seega olid nad ehituses väga tähtsal kohal. Paljudes projektides on kasutatud kruvivaiu, mille labade diameetrid on vahemikus 0.8...1.8 meetrit. Sellises suuruses kruvivaiad nõuavad laiaulatuslikku tootmist ning kahtlemata nõudis selliste vaiadega ümberkäimine erilist tehnikat ajal, mil ehitati käsitsi, kasutades ainult lihtsamaid mehaanilisi võtteid. Kruvivaiadel ja kruvisilindritel oli lai kasutusala, kuid enim kasutati neid vundamendina tuleornidel, sildadel ning ookeanidesse ulatuvatel kaidel. Kruvivaiad on tänapäeval gabariititelt väiksemad, kuid kasutuskohad on

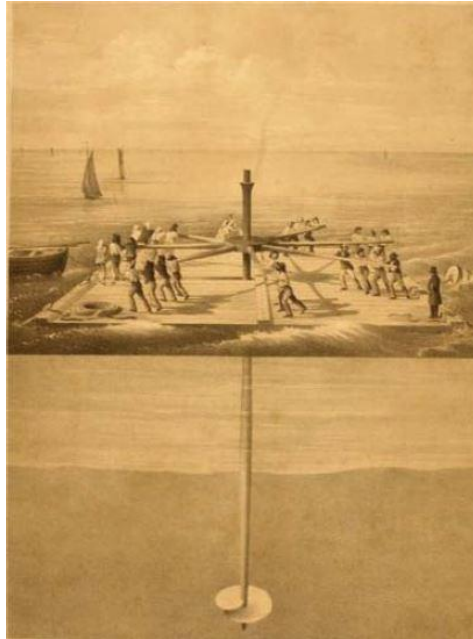
suures osas samad: uute ehitiste ehitamine, vanade ehitiste tugevdamine, nõlvade stabiliseerimine, kaevikute stabiliseerimine, tornide ankurdamine. [2]

### **1.2.1. Kruvivaivundamentide looja – Alexander Mitchell**

Paljude ajaloolaste arvates oli Alexander Mitchell (1780–1868) mees, kes esimesena tutvustas kruvivaiade vundamendi süsteemi. Alexander Mitchell oli liri ehitaja ja telliskivide tootja. Mitchell sündis 1780. aasta 13. aprillil Dublinis 13-liikmelise pere kaheksanda pojana. Mitchelli ametlik koolitee oli umbes neli aastat Belfasti Akadeemias. Tema nägemine oli varajasest noorusest alates kehv ning halvenes üha, 21-aastaselt kaotas Mitchell oma nägemise täielikult. Võtnud vennalt laenuks 100 Inglise naela, alustas Mitchell 20-aastaselt telliskivide tootmise äri, mis laienes hiljem edasi hoonete ehitamiseks. Tema põhitegevuseks oli kruvivaiade ning kruviankrute arendamine. Mitchell lõi nii UK-s kui USA-s kaasa majakate ehitamisel, kus kasutati vundamendiks kruvivaiu. Arvatakse, et kruvivaia idee kasvas välja laevade turvalise sildumise probleemist sadamates, kus võeti esialgu kasutusele kruviankrud. Mitchellil puudus inseneri haridus, kuid ta nimetas ennast korduvalt tsiviilinseneriks. 1837. aastal valiti Alexander Mitchell tsiviilinseneride liitu (Institution of Civil Engineers), kus jätkati kruvivaiade tootmise arendamist. [2, 3]

### **1.2.2. Kruvivaiadele ehitatud tuletorid**

Maplin Sands oli esimene tuleorn, mille puhul kasutati kruvivaivundamenti. Tuleorni kruvivaivundamendi otsatarbekusse suhtuti skeptiliselt, seetõttu jäeti vundament ligi kaheks aastaks seisma, kuni arvatav stabiilsus on tagatud. Samal ajal otsustas tuleorni juhatus ehitada järgmise tuleorni Morecambe Bay'l, tuntud kui Wyre'i tuleorn. Sellest sai esimene valmis tuleorn kruvivaivundamendil. Peale Wyre'i tuleorni valmimist jätkati Maplin Sandsi tuleorni ehitamist. Joonisel 1.1. on kujutatud töömehi parve peal vaia maa sisse süvistamas. [4, 5]

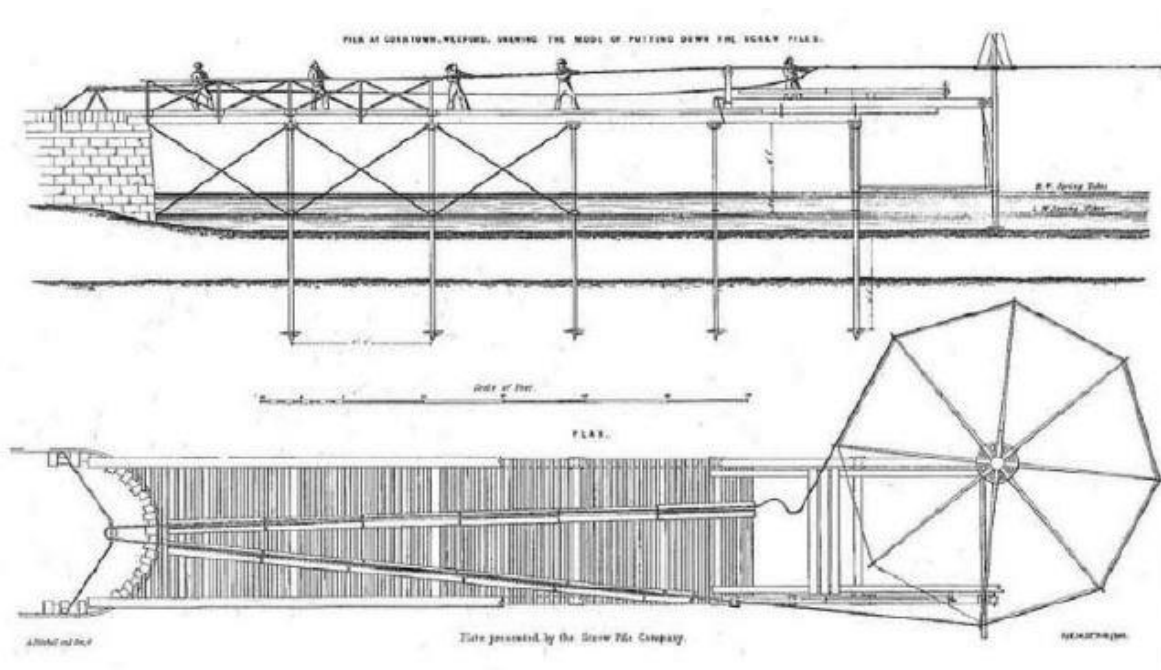


**Joonis 1.1.** Avatud merel parvel kruvivaia maa sisse süvistamine [2]

Enne Maplin Sandsi tuletorni vaiade süvistamist tehti hoolikas pinnase uurimine ning otsustati kasutada üheksat rauast kruvivaia. Vaia tüve läbimõõt oli 12,7 sentimeetrit, laba diameeter 1,2 meetrit ning kogupikkus 7,9 meetrit. Maplin Sandsi ja Wyre'i tuletornid olid edukad ning kui kapten W. H. Swift külastas 1843. aastal Maplin Sandsi tuletorni, siis soovitas ta kruvivaiadel tuletorne ka USAs kasutama hakata. Üsna pea jõudis kruvivaiade kasutamine tuletornide vundamentidena ka USAsse ning 1861.–1880. aastal ehitati USAs üle 60 kruvivaiadel tuletorni. [4, 6]

### **1.2.3. Kruvivaiade kasutamine sildade ja kaide ehituses**

Samal ajal kui kruvivaiadel tuletornide ehitamine juba käis, tegeles Mitchell kruvivaiade arendamisega edasi ning otsis neile uusi rakendusi. Sellest sai alguse kaide ehitamine, üks esimesi töid oli 1847. aastal Courtownis olemasoleva kai laiendamine. Ehitustööd Courtownis näitasid, et kruvivaiu saab edukalt kasutada avamerele ulatuvate kaide ehitamisel. Kruvivaiade kasutamine kiirendas oluliselt ehitust ning aitas raha kokku hoida. Kaide ehitusel kruvivaiade süvistamisel kasutati kokkukõidetud nõõri, mida tõmmates aeti ringi vaia külge kinnitatud suurt ratast. Kai ehitust avamerele on kujutatud alljärgneval joonisel 1.2. [2, 6]



**Joonis 1.2.** Vaia maa sisse süvistamine kaide ehituses [6]

Tänu sellisele meetodile oli võimalik kaisid ehitada järjest mere poole liikudes. Suure ratta abil, mida aeti nõoriga ringi, said töömehed turvaliselt kai peal töötada. [6]

Courtownis valminud kai pälvis suurt tähelepanu ning peagi hakati ehitama kruvivaiadele rajatud sildu. Sildade ehitusel tulid kasutusele kruvisilindrid, vajaduse selleks tekitasid sildade alt liiklejad. Tänu suuremale diameetrile polnud kruvisilindritega sildade vundament niivõrd haavatav kui kruvivaiade puhul. Kruvivaia diameetri suurenedes oli vaia maa sisse süvistamiseks vaja ka suuremat väändejõudu. Esmalt tulid inimjõu asemel kasutusele loomad ning hiljem hakati kasutama auru- ja hüdraulilist jõudu. [2, 7, 8]

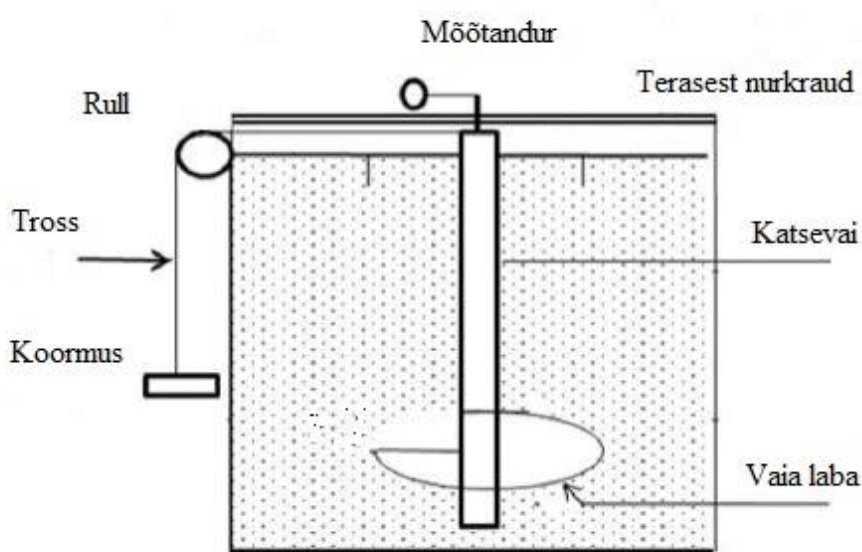
## 1.3. Varasemad uurimustulemused

### 1.3.1. Kruvivaia horisontaalkandevõime

Kruvivaiad sisaldavad ühte või mitut ringikujulist laba, mis on keevitatud vaia tüve külge kindlale kõrgusele ning kindlas asetuses. Varasematest uuringutest selgub, et kruvivaiade surve- ja tõmbekandevõimet on palju uuritud, kuid nende külgsuunas koormamise kohta on vähe infot. Kruvivaiu kasutatakse tornide vundamentides ja kaldaaladel. Nad taluvad lisaks

surve- ja tõmbejõule ka horisontaalset koormust. F.M. Abdrabbo ja A.Z. El Wakil uurisid kruvivaiade horisontaalkandevõimet läbi mudeli katsete. Tulemustest selgus, et vaia suurem kinnitussügavus ja pinnase nihketugevus tagavad suurema horisontaalkandevõime ning labadega vaia horisontaalkandevõime on 1,2...1,5 korda suurem kui labadeta vaiade kandevõime. Varasemalt on uuritud horisontaalkandevõimet savi sees, kus tulemuseks oli labadega vaiade 1,2–1,4 korda suurem kandevõime, võrreldes labadeta vaiadega. [9, 10, 11, 12]

Kruvivaiade horisontaalkandevõimet liivas läbi laboratoorsete katsete on uurinud F.M. Abdrabbo ja A.Z. Wakil. Katsekehadeks kasutati kruvivaiu, mille tüve diameeter oli 20 mm ning kogupikkus 600 mm. Kruvivaia labad olid tehtud 2 mm paksusest terasest,. Katsetel kasutatud kruvilabade diameetrid olid 30 mm, 50 mm, 100 mm ja 150 mm ning kruvilaba keerme kõrgus 20 mm. Kruvilabad on keevitatud vaia tüve külge erinevatele kõrgustele. Joonisel 1.3. on kujutatud horisontaalselt koormatud vaia katse skeemi. Pinnasekast oli valmistatud terastorst, mille diameeter oli üle kolme korra suurem 150 mm kruvilaba diameetrist ning kasti kõrgus oli 600 mm. Pinnasekasti ülemiste servade peale toetati terasest nurkraud, kuhu omakorda paigaldati horisontaalset siiret mõõtev andur (mõõteviga  $\pm 0,01$  mm). Koormust lisati koormusketaste abil, mis olid trossi ja rulli abil ühendatud katsevaia peaga. Ühe koormusastme kestvus oli kolm minutit või oodati kuni horisontaalse siirde peatumiseni. [9]



**Joonis 1.3.** Horisontaalkandevõime katse skeem [9]

Laboratoorsetel katsetel kasutatud pinnase tihedus oli  $\rho = 1,56 \dots 1,82 \text{ g/cm}^3$ . Pinnast tihendati 150 mm kihtidena 4 kg kaaluva vasaraga. Vai paigaldati enne tihendamist, ei tehtud vaia süvistamist keeramise abil. Katsete tulemused on kirjeldatud tabelis 1.1. [9]

**Tabel 1.1.** Laboratoorsete katsete programm ja tulemused [9]

Katse nr	Laba diameeter, mm	Labade kõrgus, mm	Labade arv, tk	Labade vahe, mm	Koormus, kN	Vaia sügavus, mm	Suhtarv
1	30	600	1	–	0,12	600	1
2	50	600	1	–	0,14	600	1,17
3	100	600	1	–	0,16	600	1,33
4	150	600	1	–	0,19	600	1,58
5	50	400	1	–	0,19	600	1,58
6	100	400	1	–	0,21	600	1,75
7	150	400	1	–	0,23	600	1,91
8	50	300	1	–	0,21	600	1,75
9	100	300	1	–	0,23	600	1,91
10	150	300	1	–	0,25	600	2,1
11	50	200	1	–	0,22	600	1,83
12	100	200	1	–	0,24	600	2
13	150	200	1	–	0,26	600	2,17
14	150	300	2	20	0,25	600	2,1
15	150	300	3	20	0,29	600	2,42
16	150	300	4	20	0,29	600	2,42
17	150	300	2	30	0,30	600	2,42
18	150	300	2	40	0,33	600	2,75
19	150	300	2	60	0,36	600	3
20	150	300	2	80	0,34	600	2,83
21	30	600	1	–	0,11	540	0,92
22	30	600	1	–	0,09	480	0,75
23	30	600	1	–	0,06	420	0,5
24	150	300	2	60	0,36	540	3
25	150	300	2	60	0,28	480	2,33
26	150	300	2	60	0,22	420	1,83

Märkus. Suhtarv = labadega vaia kandevõime/labadeta vaia kandevõime.

Analüüsides kruvivaiade horisontaalkandevõime laboratoorsete katsete tulemusi, jõuti järeldustele [9]:

- Kõige suurem kandevõime oli vaiadel, mille labad asetsesid maapinnast 200...300 mm sügavusel.
- Kruvilabade arvukuselt oli kõige ökonoomsem kasutada kahte kruvilaba.
- Efektiivseim labade omavaheline vahe oli 60 mm.
- Labadega kruvivaiade kandevõime oli kuni 2,42 korda suurem kui labadeta sileda vaia kandevõime.

- Horisontaalkandevõime sõltub pinnase omadustest, vaia süvistamissügavusest, vaia tüübist (labadeta või labadega) ning kruvilabade arvust.

Antud uurimuse tulemustest on näha, et labade arvukusel ja asetusel on väga suur mõju kruvivaia horisontaalkandevõimele.

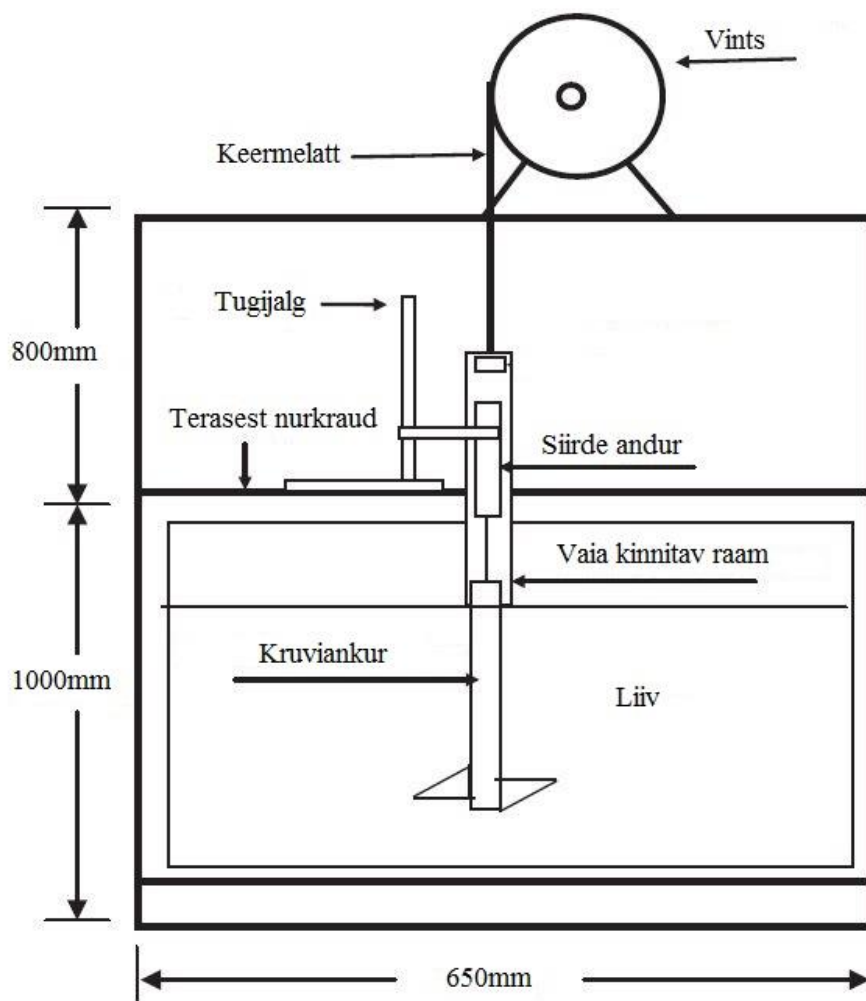
### **1.3.2. Kruvivaia/kruviankru vertikaalkandevõime**

Kõrged ehitised, näiteks telekommunikatsiooni mastid või kõrgepinge elektri mastid, on avatud suurtele küljelt mõjuvatele koormustele – tuultele. Küljelt mõjuvad koormused põhjustavad vundamentides suuri tõmbe- ja survepingeid. Kõrgehitise stabiilsuse kadudes on tõmbepinged/survepinged suuremad kui ehitise kaal. Ehitist projekteerides tuleb arvestada külgsuunast mõjuvate jõududega ning traditsiooniliselt kasutatakse kõrgehitistel massiivseid vundamente, et vältida torni stabiilsuse kadumist. Paraku on massivsete vundamentide ehitamine ajaliselt ja materiaalselt kulukas. Massiivsete vundamentide alternatiiviks soovivad insenerid kasutada maapinna ankruid. Enim kasutatust maapinna ankruite vallas on leidnud kruviankrud. Nende paigaldamisel kasutatakse spetsiaalse tehnikaga varustatud sõidukit, mille abil kruviankrud maa sisse keeratakse. Tehnika kuvab paigaldamise ajal väändemomenti ning soovitud väändemomendi saavutades on ankur saavutanud oma kandevõime. Arvatakse, et kruviankur suudab taluda 100...400 kN tõmbejõudu olenevalt kruvilabade suurusest, arvust ning pinnase omadustest. Pinnase hõõrdenurga, kruvilabade diameetri ja kruvilabade arvu suurenedes kasvab kruviankru tõmbe- ja survekandevõime. Kruviankurvundamendid on efektiivsed, kuna nende paigalduskiirus on suur ning paigaldamine lihtne. Kruviankrute kitsas kasutusvaldkond on tingitud ratsionaalse ja usaldusväärse meetodi puudumisest. Ankrute tõmbekandevõime ja kandevõime kadumise käitumise uurimiseks on välja töötatud palju teooriaid, kuid paraku esineb nendes palju puudusi. Ideaalse mudeli välja töötamiseks on edaspidised uurimused väga vajalikud. [13]

Kruviankru käitumist kuivas liivas on uurinud Ramli Nazir, How Seng Chuan, Hamed Niroumand ja Khairul Anuar Kassim. Laboratoorsete katsete abil uuriti vertikaalsete kruviankrute tõmbekandevõimet ja pinnase deformatsioone. Katsetel kasutatud pinnas oli

kuiv liiv ning katsekehadeks olid ühe labaga kruviankrud. Uurimus toetub katsetele, kus süvistamissügavuse ja laba diameetri vaheline suhe ( $H/D_h$ ) jäävad vahemikku 1...5. [13]

Laboratoorses katsetes kasutatud kruviankru tüve diameeter oli 30...50 mm ning kruvilaba diameeter ( $D_h$ ) 100 mm. Tõmbekatsed toimusid ruudukujulises klaasist konteineris, mille küljepikkused olid 650 mm ning sügavus 1000 mm (vt joonis 1.4.). Konteineri üles oli raami külge kinnitatud elektriline vints, mille liikumiskiirus oli 0,6 mm minutis. Kruviankru ja vintsi vahel oli kruviankru siiret mõõtev andur. [13]



**Joonis 1.4.** Tõmbekatse skeem [13]

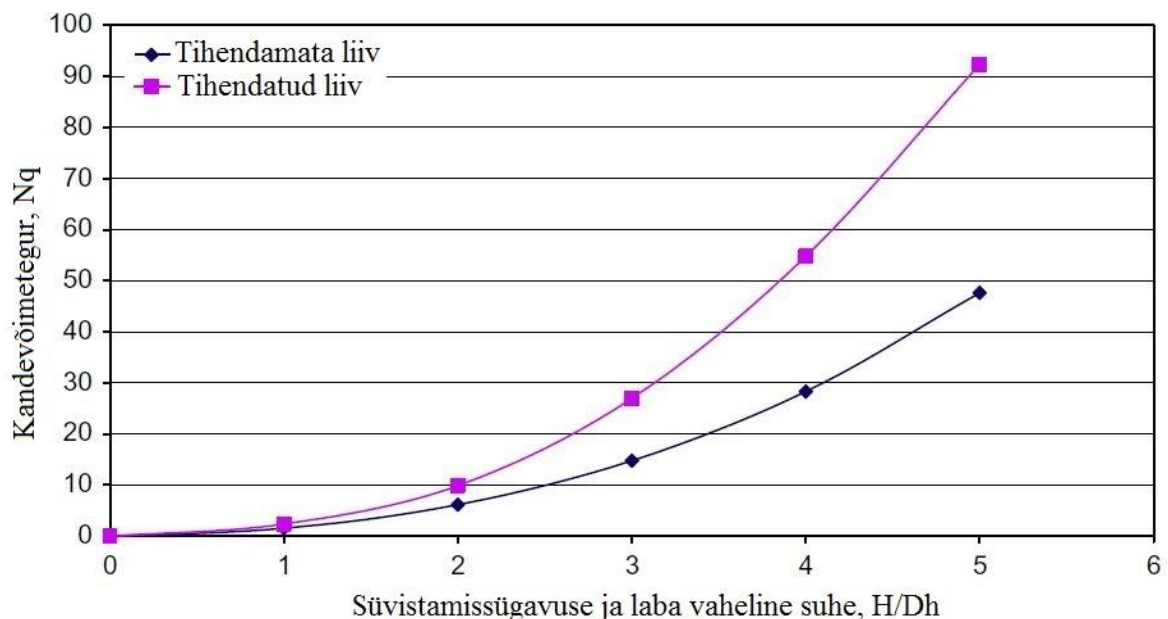
Tõmbekatseid tehti tihendamata ja tihendatud pinnasega. Tihendamata pinnase puhul asetati katsekeha vertikaalselt kasti, ühendati vintsi ja seega lasti liival kukkuda katsekeha 330 mm kõrguselt kuni soovitud kõrguseni. Pinnase tihendamisel kasutati väikest pinnase



tihendajat, millega tihendati pinnas 75 mm paksuste kihtide kaupa. Kruviankrut koormati kiirusega 0,6 mm minutis ning ankru siirdenäit salvestati iga 10 sekundi järel. [13]

Pinnases toimuvate protsesside nägemiseks kasutati keskelt poolitatud ankruid klaaskastis, kus kruviankur oli paigutatud lõigatud küljega klaasi vastu. Kasti klaasist külje laius oli 600 mm, kitsam külg 260 mm ning sügavus 400 mm. Pinnase deformatsioonide nägemiseks kasutati värvitud liiva, mida puistati 3 mm paksuste kihtidena 20 mm intervalliga. Pinnase deformatsiooni katsed toimusid tihendamata ja tihendatud liivaga. Koormust rakendati 0,6 mm minutis kuni kruviankru kandevõime kadumiseni. [13]

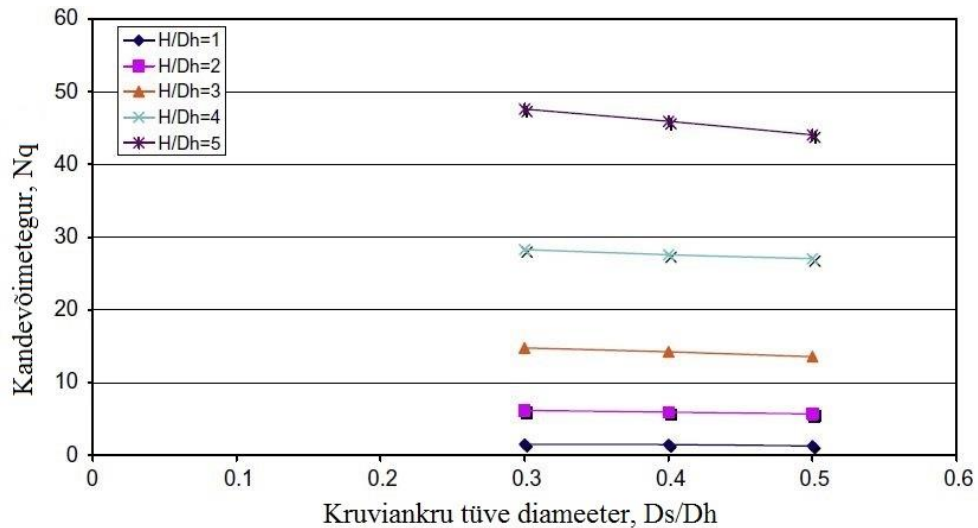
Kruviankru tüve diameetri, süvistamissügavuse ja laba diameetri suhte ning liiva tiheduse mõju uurimiseks tõmbekandevõimel viidi läbi 30 katset. Tõmbekatsetel jäi süvistamissügavuse ja laba diameetri suhe vahemikku 1...5 ning kruviankru diameeter ( $D_s$ ) vahemikku 30...50 mm, kasutati tihendamata ja tihendatud pinnast. Joonisel 1.5. on kujutatud kandevõimeteguri ( $N_q$ ), kruviankru süvistamissügavuse ja laba diameetri suhte vahelist seost erinevates pinnastes. [13]



**Joonis 1.5.** Kandevõimeteguri ( $N_q$ ), süvistamissügavuse ja laba diameetri vahelise suhte ( $H/D_h$ ) seos, kruviankru tüve diameeter  $D_s/D_h = 0,3$  [13]

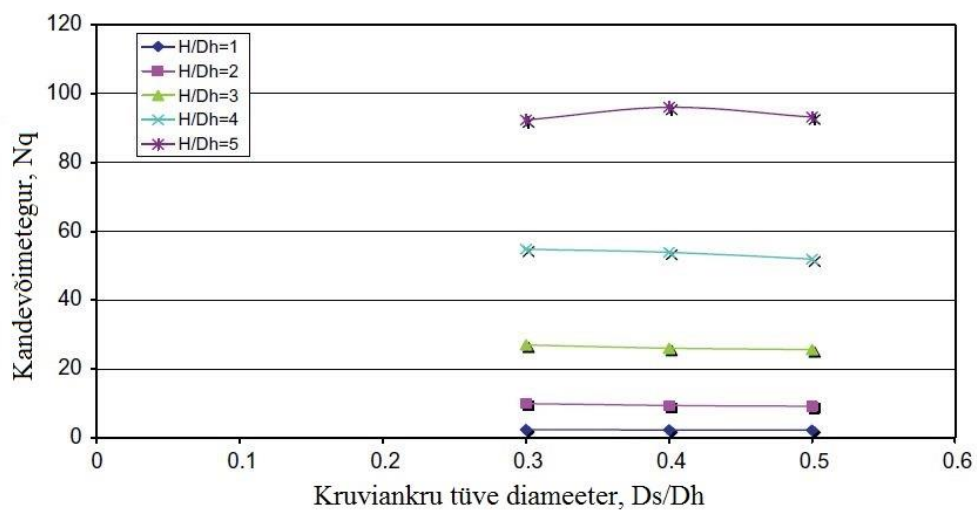
Kandevõimeteguri ( $N_q$ ) väärtus suurenes süvistamissügavuse ja laba diameetri vahelise suhte ( $H/D_h$ ) kasvades tihendatud ja tihendamata pinnase puhul. Tihendatud pinnasel kasvas kandevõimeteguri ( $N_q$ ) väärtus kiiremini. Jooniselt saab järeldada, et süvistamissügavuse ja

laba diameetri vaheline suhe ( $H/D_h$ ) omab märkimisväärselt suurt efekti kandevõimeteguri ( $N_q$ ) suurenemisel. Järgmisel joonisel 1.6. on kujutatud kandevõimeteguri ( $N_q$ ) ja kruviankru tüve diameetri ( $D_s/D_h$ ) vahelist seost tihendamata pinnases. [13]



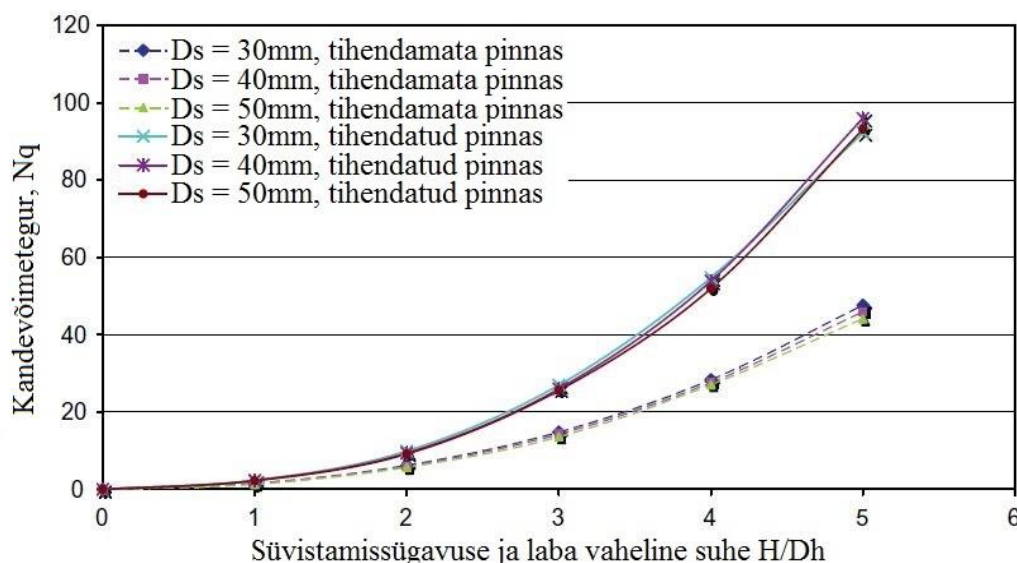
**Joonis 1.6.** Kandevõimeteguri ( $N_q$ ) ja kruviankru tüve diameetri ( $D_s/D_h$ ) vaheline seos tihendamata liivas [13]

Joonist analüüsides selgub, et tihendamata liivas ankru tüve suurenedes väheneb kandevõimetegur ( $N_q$ ). Sarnane trend ilmneb ka tihendatud pinnase puhul (vt joonis 1.7.). Tihendamata liivas kandevõimetegur ( $N_q$ ) kahaneb ankru tüve suurenedes ligikaudu 3...6% ning tihendatud liivas umbes 2...3%. Seega on tihendamata liivas mõju kandevõimetegurile suurem kui tihendatud pinnases. [13]



**Joonis 1.7.** Kandevõimeteguri ( $N_q$ ) ja kruviankru tüve diameetri ( $D_s/D_h$ ) vaheline seos tihendatud liivas [13]

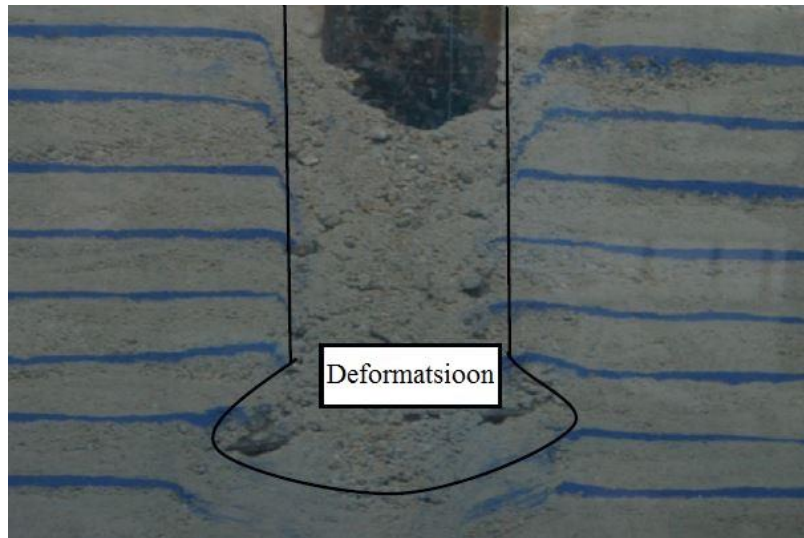
Alljärgneval joonisel 1.8. on kujutatud liiva tihedusest tingitud kandevõimeteguri ( $N_q$ ) ja süvistamissügavuse ja laba diameetri vahelise suhte ( $H/D_h$ ) seost. [13]



**Joonis 1.8.** Kandevõimeteguri ( $N_q$ ) ja kruviankru süvistamissügavuse ja laba diameetri vahelise suhte ( $H/D_h$ ) seos tihendamata ja tihendatud liivas [13]

Tihendatud pinnase kandevõimetegur ( $N_q$ ) on tihendamata pinnasest 70...90% suurem. Siit võib järeldada, et pinnase tiheduse suurenedes kasvab märkimisväärselt kandevõimetegur ( $N_q$ ). Süvistamissügavuse ja laba diameetri vahelise suhte ( $H/D_h$ ) suurenedes kasvab kruviankru ja liiva vaheline hõõrdetegur. Mitsch ja Clemence on varasemates uuringutes väitnud, et ankru tüve diameetri mõju tõmbekandevõimele on väike. Käesoleva uuringu tulemustele tuginedes saab väita, et kruviankru tüve ja pinnase vaheline hõõrdetegur ei taga märkimisväärselt suuremat tõmbekandevõimet. [13, 14]

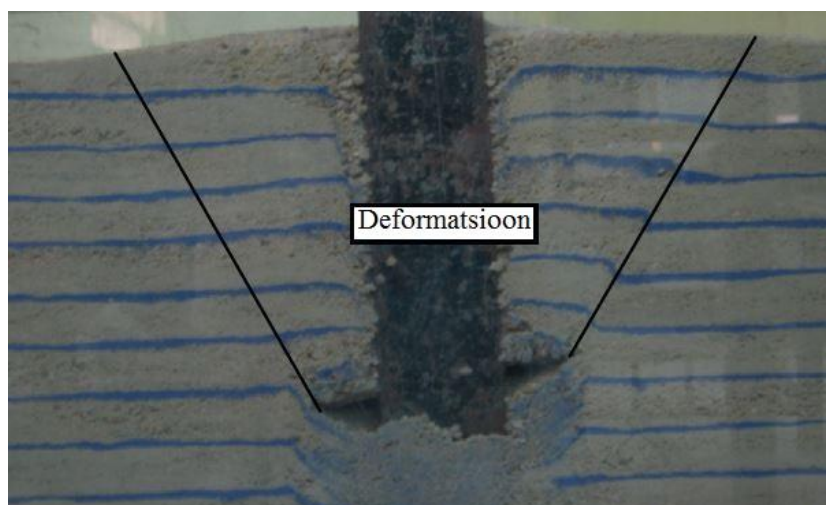
Pinnase deformatsiooni hindamiseks tehti kaks tõmbekatset – tihendamata ja tihendatud liivaga, liiva deformatsioonid jäädvustati kaameraga. Joonisel 1.9. on kujutatud tihendamata liivpinnase deformatsiooni pärast kruviankru tõmbekandevõime kaotamist. [13]



**Joonis 1.9.** Tihendamata pinnase deformatsioon pärast kruviankru tõmbekandevõime kadumist [13]

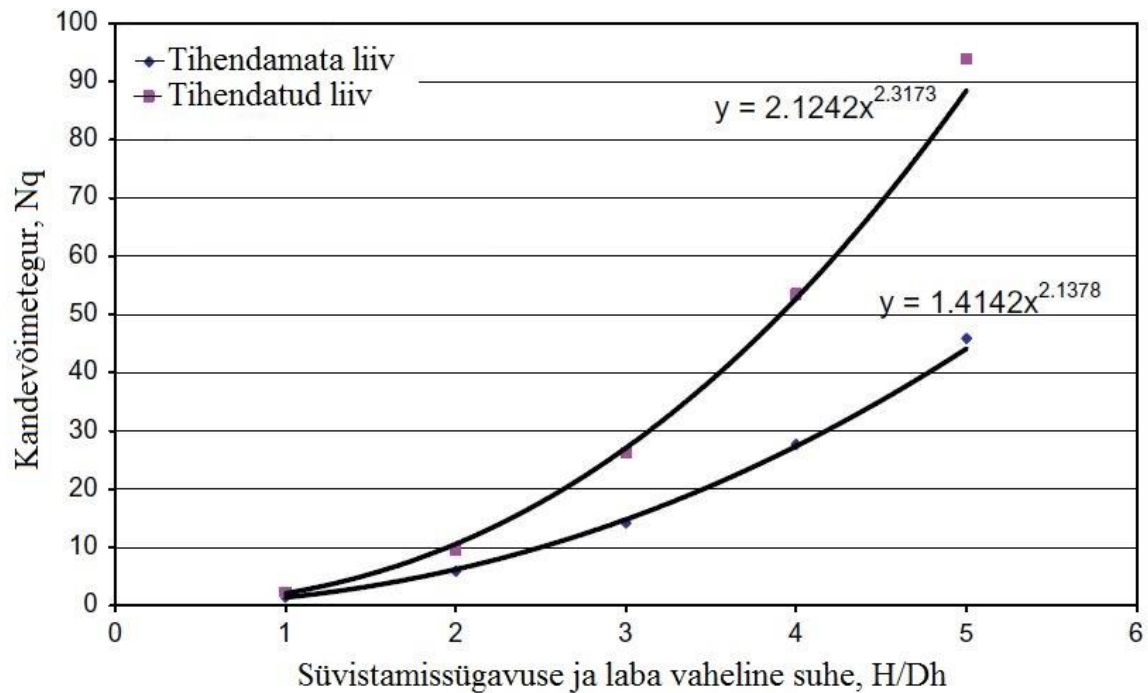
Hinnates liiva deformatsiooni kuju on näha, et see on kaarjas ja asub ankrulaba ümber. Värvitud jooned kruviankru tüve äärtes näitavad, et liiva ja ankru tüve vaheline hõõrdetegur on väike, kuid ankru laba kaasab märkimisväärse koguse pinnast. [13]

Tihendatud pinnase deformatsiooni jooniselt (vt joonis 1.10.) selgub, et kruviankru koormamisel hakkas ankru tüve ümber olev pinnas kaasa liikuma. Deformatsioon on koonilise kujuga ning vertikaaltelje suhtes ligikaudu 30-kraadise nurga all. Deformatsiooni nurk on hinnanguliselt  $\frac{2}{3}$  tihendatud pinnase hõõrdenurgast, mis kinnitab Ghaly et al. uurimust. [13,15]



**Joonis 1.10.** Tihendatud pinnase deformatsioon pärast kruviankru tõmbekandevõime kadumist [13]

Laboratoorsetest katsetest saadud andmeid kasutati selleks, et töötada välja empiiriline seos. Antud uurimuses töötati välja kaks empiirilist seost – tihendamata ja tihendatud liivale. Tihendamata liiva pinnase deformatsioon oli kaarja kujuga, tihendatud pinnase deformatsioon koonilise kujuga. Tihendatud liivpinnase deformatsioon oli alati suurem kui tihendamata pinnase deformatsioon. Alljärgneval joonisel 1.11. on kujutatud katsetest tuletatud empiirilisi seoseid. [13]



**Joonis 1.11.** Katsetest tuletatud empiirilised seosed [13]

Tuletatud empiirilisi seoseid võrreldi kahe eksisteeriva teooriaga – Mitschi ja Clemence'i ja Ghaly et al. teooriatega. Mitsch ja Clemence väitsid, et katsed, kus süvistamissügavuse ja laba diameetri vaheline suhe ( $H/D_h$ ) on vahemikus 1...5, nimetatakse madalateks kruviankruteks. [14, 15]

Mitschi ja Clemence'i teooriat kinnitab alljärgnev valem 1.1. [14]:

$$Q_u = \pi \gamma' K_u \tan \phi \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} \right) \left\{ \frac{D_1 H_1^2}{2} + \frac{H_1^3 \tan \left( \frac{\phi}{2} \right)}{3} \right\} + W_s, \quad (1.1.)$$

kus  $Q_u$  on ankru maksimaalne tõmbekandevõime;

$\gamma'$  – pinnase mahukaal;

$K_u$  – liiva horisontaalsurve;

$\varphi$  – pinnase hõõrdenurk;  
 $D_I$  – ülemise kruvilaba diameeter;  
 $H_I$  – ülemise kruvilaba sügavus.

Ghaly et al. käsitleb oma uurimuses madalaid ankruid, mille süvistamissügavuse ja laba diameetri vaheline suhe ( $H/D_h$ ) pole üle 11. [15]

Ghaly et al. teooriat kinnitab alljärgnev valem 1.2. [15]:

$$Q_u = P_p + W, \quad (1.2.)$$

kus  $Q_u$  on ankru maksimaalne tõmbekandevõime;

$P_p$  – pinnase passiivsurve;  
 $W$  – deformeerunud liivpinnase kaal.

Pinnase passiivsurve leitakse järgmiselt [15]:

$$P_p = \frac{\pi}{2} \gamma H^2 K'_p \left[ \frac{B + H \tan \theta}{\cos \theta} \right] \tan \delta, \quad (1.3.)$$

kus  $\gamma$  – pinnase mahukaal;

$H$  – ankru süvistamissügavus;  
 $K'_p$  – maapinna surve modifitseeritud konfitsient;  
 $B$  – kruvilaba diameeter;  
 $\theta$  – deformeerunud koonilise pinnase nurk vertikaaltelje suhtes;  
 $\delta$  – pinnase keskmine nihketugevus.

Deformeerunud liivpinnase kaalu leitakse järgmise valemiga [15]:

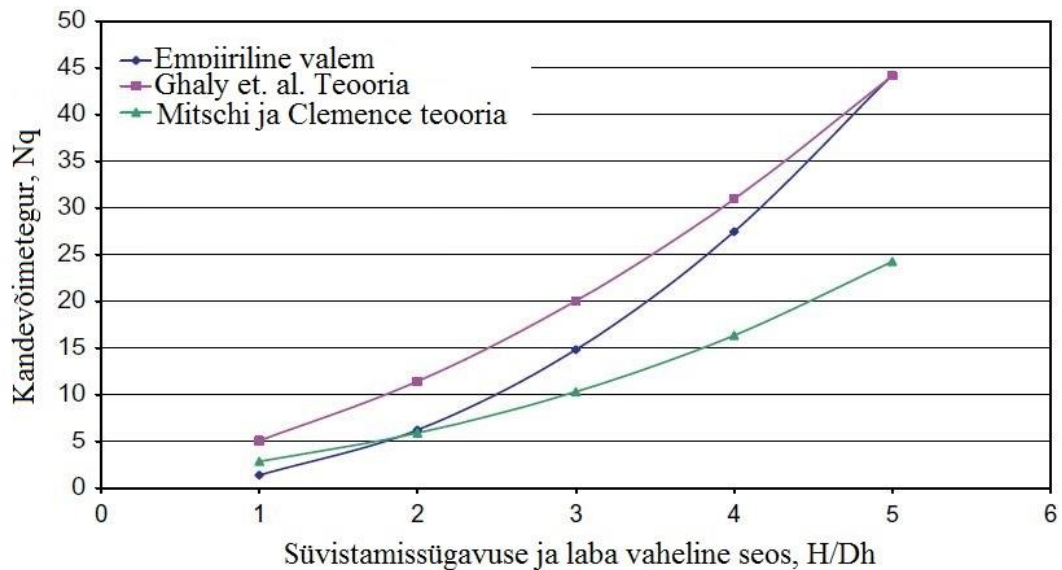
$$W = \frac{\pi}{2} \gamma H (b^2 + r^2 + br), \quad (1.4.)$$

kus  $b$  – kruvilaba raadius;

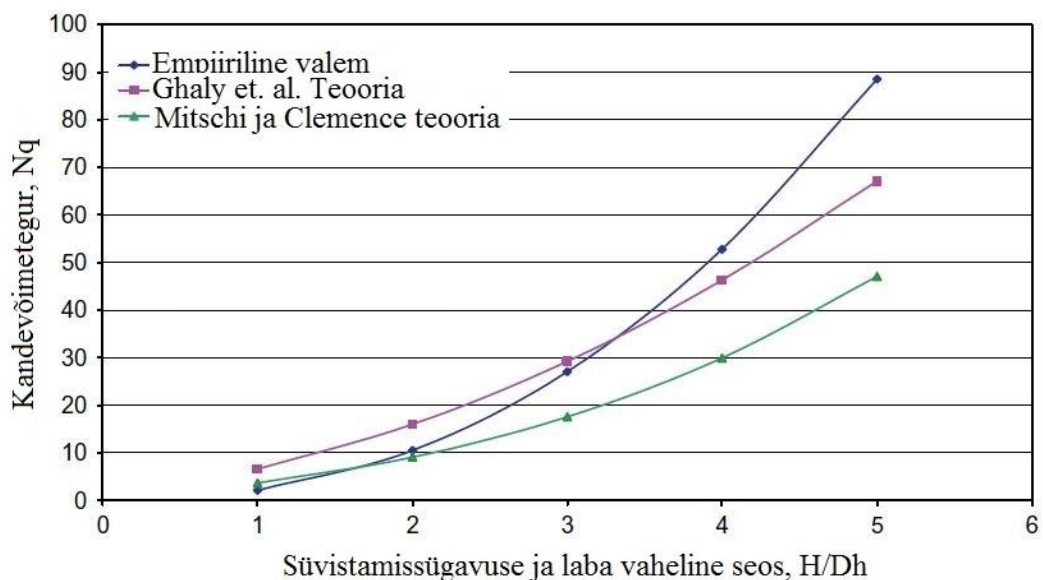
$r$  – deformeerunud pinnase raadius.

Joonisel 1.12. ja 1.13. on kujutatud autori empiirilise seose, Mitschi ja Clemence'i ning Ghaly et al. teooriate vahelist võrdlust tihendatud ja tihendamata liivas. Tihendamata liiva puhul on näha, et madala kandevõimeteguri ( $N_q$ ) juures kattub empiiriline seos Mitschi ja

Clemence'i teooriaga. Süvistamissügavuse ja laba diameetri vahelise suhte ( $H/D_h$ ) kasvades hakkas empiiriline seos kattuma Ghaly et al. teooriaga. Mõlema pinnase puhul on empiirilise seose kandevõimetegur ( $N_q$ ) võrreldes Mitschi ja Clemence'i teooriaga suurem. Tulemustest saab järeldada, et Mitschi ja Clemence'i teooria on autori empiirilise seosega kattuvam kui Ghaly et al. teooria. Kruviankru kandevõimetegur ( $N_q$ ) on tihendatud pinnases suurem kui tihendamata pinnases. [13, 14, 15]



**Joonis 1.12.** Empiirilise seose ja olemasolevate teooriate vaheline võrdlus tihendamata liivas [13]



**Joonis 1.13.** Empiirilise seose ja olemasolevate teooriate vaheline võrdlus tihendatud liivas [13]

Tsuha C.H.C. et al. teadustöös uuriti ühe vertikaalse kruviankru tõmbekandevõime käitumist liivas. Töö käigus viidi läbi laboratoorsed katsed, et välja selgitada tõmbekandevõimet mõjutavad peamised faktorid. Uurimuses käsitleti kolme erineva tüve diameetriga kruviankruid erinevate süvistamissügavuste ning pinnase tihedusomaduste juures. Hinnates kruviankru tüve diameetri mõju on näha, et tüve diameetri suurenedes tõmbekandevõime oluliselt ei suurene. Tihendamata ja tihendatud pinnase korral talus tihendatud pinnas alati suuremat tõmbekoormust kui tihendamata pinnas. Tihendatud pinnase tõmbekandevõime oli 70...90% suurem tihendamata pinnase tõmbekandevõimest. Pinnase deformatsioone analüüsides selgus, et tihendatud pinnase deformatsioon oli koonilise kujuga ning tihendamata pinnasel kaarja kujuga ümber ankru laba. Mitsch ja Clemence ning Ghaly et al. on varasemates uuringutes väitnud, et tihendatud pinnase deformatsioon on koonilise kujuga. Tuginedes labori katsetele tuletasid autorid empiirilise seose, mida võrreldi Mitschi ja Clemence'i ning Ghaly et al. teooriatega. Võrdlusest saab järeldada, et Tsuha C.H.C. et al. empiiriline seos kattus paremini Ghaly et al. teooriaga. [13, 14, 15]



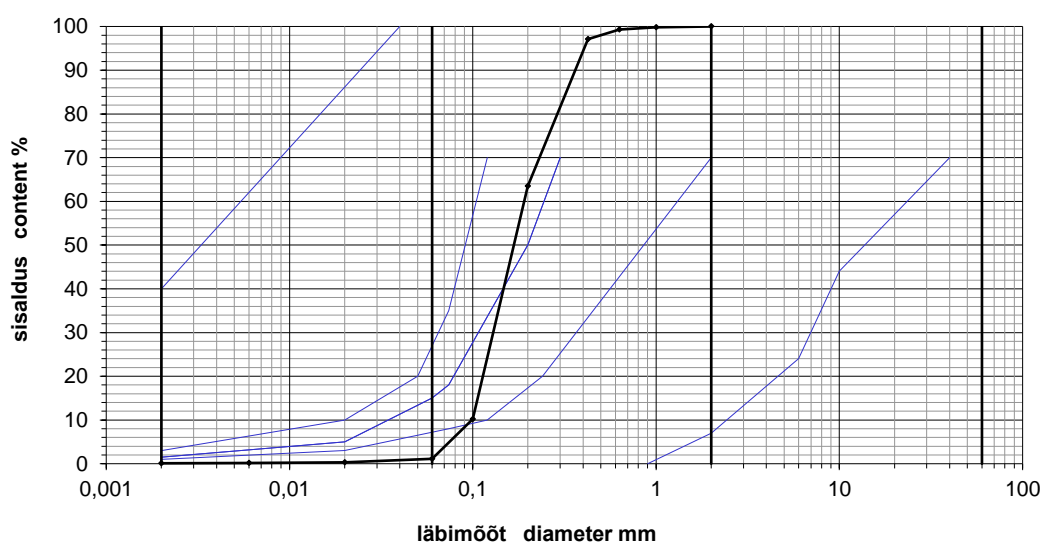
## 2. KATSETE METOODIKA JA MATERJALID

### 2.1. Liivakasti pinnas

Katsetel kasutatud peenliiv pärineb Aardlapalu karjäärist. Pinnas on kaevandatud hüdrokevandamise teel, mistõttu on peened savi- ja huumuseosakesed tehnoloogiliste protsesside tõttu välja uhutud. 2015. aastal on labori pinnasekasti pinnase parameetreid uurinud Erko Vares, kes viis pinnasekastist kolmekilose proovi Eesti Keskkonnauuringute keskusesse. Tulemuste järgi liigitus võetud pinnas peenliivaks. Tabelis 2.1. on välja toodud lõimise jaotumine fraktsiooni järgi ning lõimiskõver joonisel 2.1. [16]

**Tabel 2.1.** Lõimise jaotumine fraktsiooni järgi [16]

	Fraktsiooni läbimõõt mm, sisaldus %																
	Veeris	Kruus				Liiv				Möll				Sau	<0,06	<0,002 / <0,06	C <sub>u</sub>  d <sub>60</sub> / d <sub>10</sub>
Pinnas		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen					
EVS 1997-1:2003		>60	60...20	20...6	6...2	kokku	2...0,6	0,6...0,2	0,2...0,06	kokku	0,06...0,02	0,02...0,006	0,006...0,002	kokku			
peenliiv	0	0	0	0	0	0,7	35,8	62,4	98,9	0,8	0,1	0,1	1,0	0,1	1,1	9,1	1,9



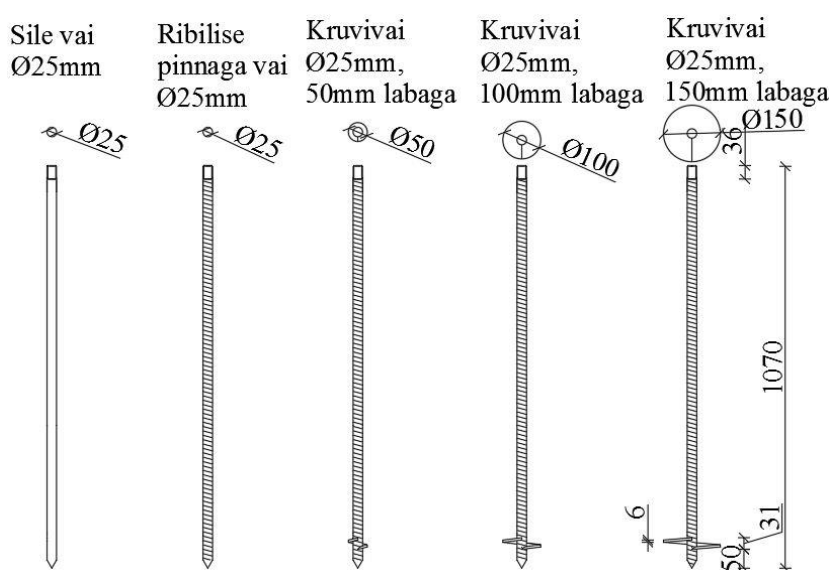
**Joonis 2.1.** Pinnase lõimiskõver [16]

Pinnasekastis olev liiv on väga ühtlane, koosnedes peamiselt peenliiva ja keskliiva fraktsioonist ning moodustades 98,2% kogu sisaldusest. Laborisse viidud pinnase sisehõõrdenurk ( $\phi$ ) oli 31 kraadi ning pinnase nidusus ( $c$ ) oli 6 kPa. [16]

Laboratoorsete katsete juures kasutati pinnase tihendamisel 64 kg kaaluvat tamperit Dynapac LT 600. Enne igat katset tihendati pinnast 0,7, 0,4 ja 0,1 m sügavuselt. Katsete käigus võeti kahel korral pinnaseproovid erinevatelt sügavustelt. Veesisalduse arvutamiseks kuumutati pinnaseproove eelnevalt 105 kraadi juures ahjus kuni püsiva massi saavutamiseni. Esimesed pinnaseproovid võeti kuuenda ja seitsmenda katse vahel ning tulemusteks saadi veesisalduseks  $w = 6\ldots 10\%$  ning tiheduseks  $\rho = 1,65\ldots 1,66 \text{ g/cm}^3$ . Teine pinnaseproov võeti 13. ja 14. katse vahel ning tulemusteks tulid veesisaldus  $w = 9\ldots 12\%$  ning tihedus  $\rho = 1,66\ldots 1,71 \text{ g/cm}^3$ . Kuna pinnasekasti kohal asus kaloriifer, siis tuli pinnast aeg-ajalt kasta, kuid olenemata pealmise kihi kastmisest olid sügavamalt võetud proovid alati suurema veesisaldusega.

## 2.2. Katsekehad

Laboratoorsetel katsetel kasutatud katsekehasid oli kokku 10, nende hulgas oli viit eri tüüpi vaiasid. Kasutusel oli labadeta ja labadega vaiasid ning kõik vaiad olid valmistatud terasest (vt joonis 2.2.).



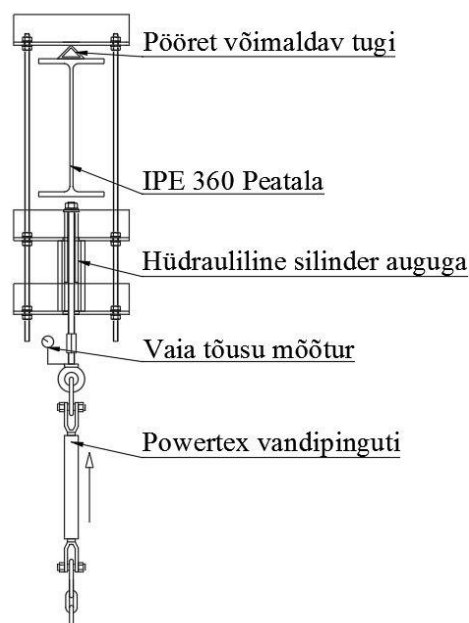
**Joonis 2.2.** Kasutatud vaiatüübid

Kõikide vaiade kogupikkused olid 1070 mm ning vaiaotsad olid treitud kooniliseks 45-kraadise nurga all vaia pikitelje suhtes. Vaiade tüved olid läbimõõduga 25 mm ning ülemised otsad keermestatud M24 keermega. Kahe vaia näol oli tegemist sileda armatuuriga ning ülejäänud katsekehad olid A-III armatuurid. Kuue vaia puhul kasutati kruvilabasid vaia alumistes otses ( $\varnothing 50$ ,  $\varnothing 100$ ,  $\varnothing 150$  mm), mis valmistati 6 mm paksusest terasest ning asusid vaia alumisest otsast 50 mm ülevalpool. Kruvilaba ülemise ja alumise osa kõrguste vahe oli 31 mm.

## 2.3. Katseseadmed

### 2.3.1. Vaia tõmbeseade

Kõik laboratoorsed katsed olid vaiade tüübilt ja kinnitustelt erinevad, kuid tõmbemehhanismi juures oli üks erinevus: nimelt kasutati üksikvaia katsetel IPE 360 tala peal kinni keevitatud vinkelrauda, mis võimaldas tõmbemehhanismi pööret. Alljärgneval joonisel 2.3. on kirjeldatud katsevaiade tõmbemehhanismi.



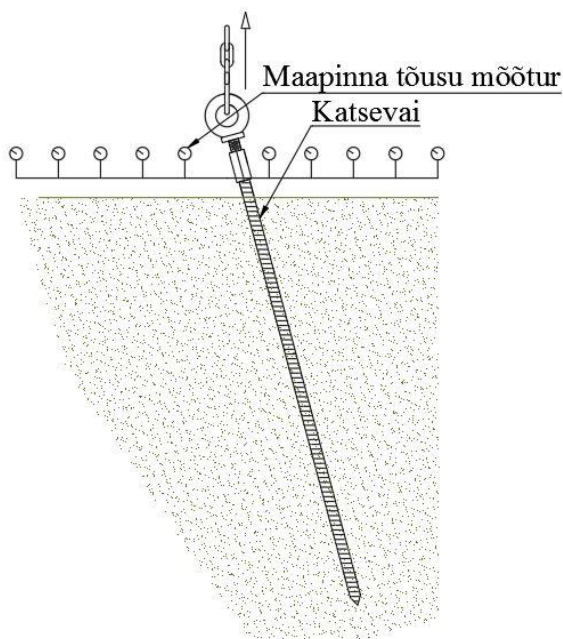
**Joonis 2.3.** Vaiade välja tõmbamisel kasutatud tõmbemehhanism

Katseseade põhiosa oli konstrueeritud kolmest UPE 200 talast, mis paiknesid lapiti. Kõigil taladel olid servadesse puuritud ringikujulised augud, mida kasutati UPE 200 talade

omavaheliseks fikseerimiseks keermelattide ja mutritega. Keskmise ja alumise UPE 200 tala keskele oli puuritud silindrikäigu jaoks auk ning nende vahele kinnitati hüdrauliline auguga silinder HC1203XT. Silindrit läbistas keermelatt, mis oli ülevalt otsast fikseeritud mutriga. Keermelati alumise otsa külge kinnitati jätkumutriga tõstesilm polt. Vaia siiret mõõtev siirdeandur oli paigaldatud tõstesilm poldi külge. Vandipinguti ühendati tõstesilm poldi külge karabiini abil. Vandipinguti alumise otsa külge riputati karabiiniga tõstekett ning keti alumise otsa külge ühendati vaiad olenevalt katsetüübist.

### 2.3.2. Üksikvaia tõmbekatse skeem

Esimene grupp katseid koosnes kümnest üksikvaia tõmbekatsesest, kus vaiad paiknesid maa sees kas 75- või 60-kraadise nurga all maapinna suhtes. Vältimaks tõmbemehhanismi deformatsioone, paigaldati IPE 360 tala peale pööret võimaldav tugi. Üksikvaia tõmbeskeemi selgitab joonis 2.4.



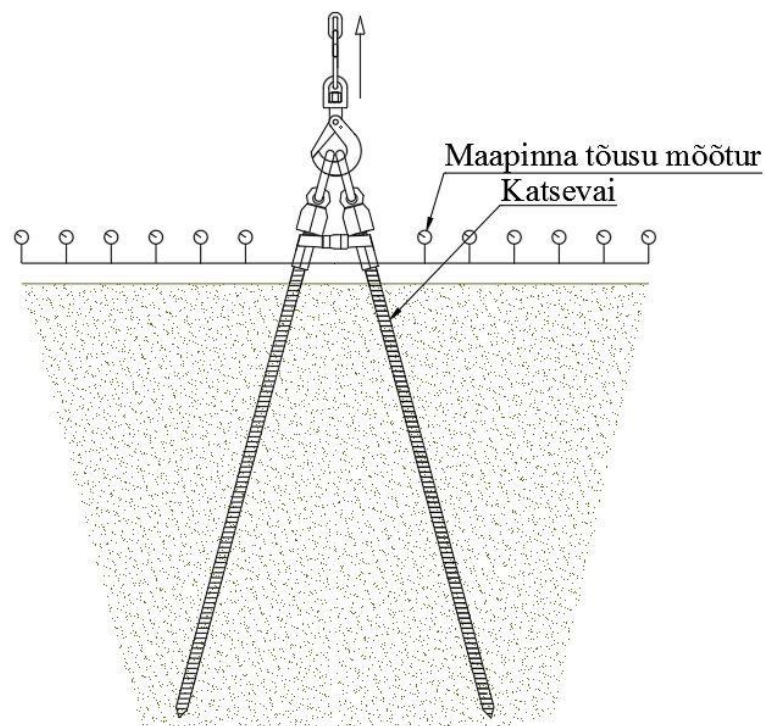
**Joonis 2.4.** Üksikvaia tõmbeskeem

Katsevai kinnitati jätkumutriga tõstesilm poldi külge, mis omakorda ühendati karabiiniga tõsteketi külge. Siirdeandurid paiknesid 75-kraadiste üksikvaia katsete puhul tõstesilmast kummalegi poole 10 sentimeetrist kuni 50 sentimeetrini, kuid 60-kraadiste katsete puhul tuli

andurite kaugust tõstesilm poldi tsentrist muuta 20 sentimeetrist 60-ni, sest vaia välja tõmmates hakkas vai siirdeandurite konstruktsiooni kaasa vedama.

### 2.3.3. Nurga all oleva kahe vaia tõmbekatse skeem

Teine grupp katseid koosnes kahe vaia katsetest, kus vaiad olid paigaldatud maapinna suhtes 75- ja 60-kraadise nurga alla. Joonisel 2.5. on kirjeldatud nurga all oleva kahe vaia tõmbeskeemi.

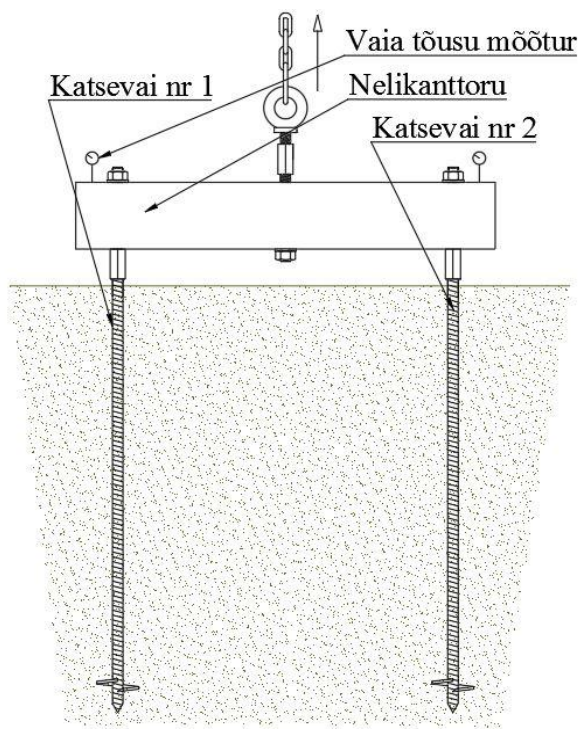


**Joonis 2.5.** Nurga all oleva kahe vaia tõmbeskeem

Mõlemad katsekehad kinnitati jätkumutritega tõstesilmade külge. Tõstesilmad riputati turvakonksu otsa ning vaiad fikseeriti omavahel koormarihmaga. Maapinna siirdeandurid olid paigaldatud vaiapaari tsentrist 20 cm kuni 60 cm kaugusele.

#### 2.3.4. Kahe vertikaalse vaia tõmbekatse skeem

Viimases katsete grupis uuriti vertikaalsete vaiade vahekauguse mõju, vaiad olid paigutatud üksteisest kas 40 või 80 cm kaugusele ning tõmbemehhanism oli rakendatud kahe katsevaia keskele (vt joonis 2.6.).

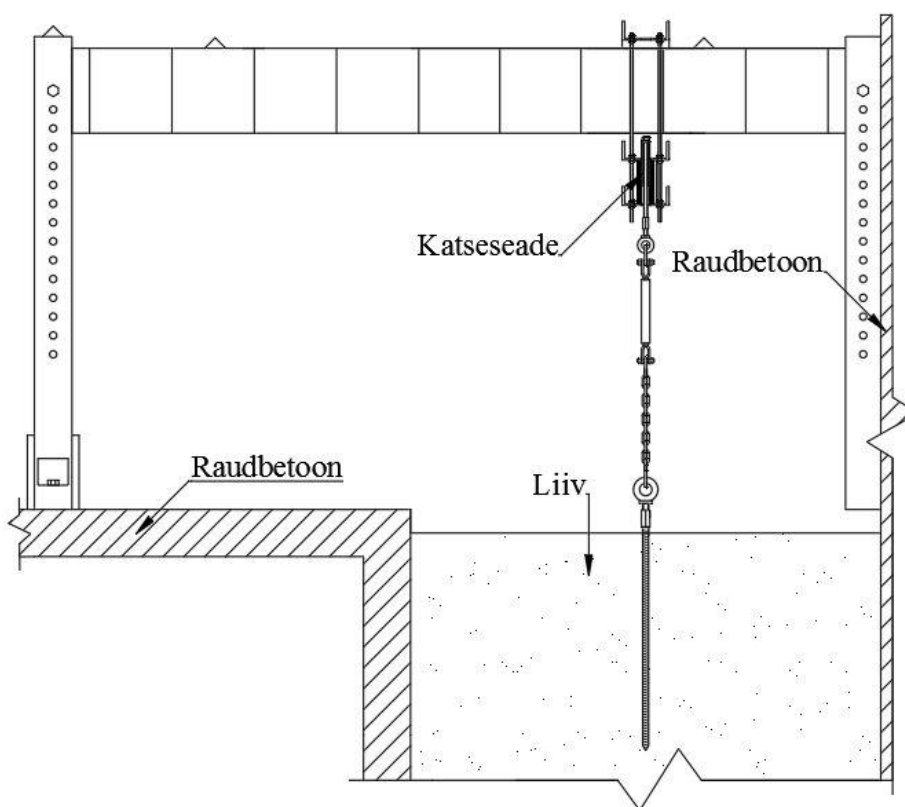


**Joonis 2.6.** Kahe vertikaalse vaia tõmbeskeem

Katses kasutatud nelikanntoru oli ristlõike mõõtudega 160 x 80 x 6 mm, mille kogupikkus oli 1000 mm. Toru on skeemil kujutatud serviti ning teda läbib viis auku. Kõik läbipuuritud augud olid ühe rea peal 200 mm sammuga ning äärmiste aukude kaugus tsentrini kummagi tala otsast oli 100 mm. Keskmisesse puuritud auku kinnitati keermelatt, mis oli altpoolt fikseeritud mutriga ning ülevalt jätkumutriga. Jätkumutter ühendati tõstesilm poldiga, mis omakorda riputati karabiiniga tõsteketi külge. Vertikaalsed katsekehad olid kinnitatud nelikanntoru külge keermelatiga, altpoolt fikseeriti jätkumutriga ning ülevalt poolt mutriga. Kummagi vaia siiret mõõdeti ka eraldi, andurid olid paigutatud vahetult katsevaia kõrvale.

### 2.3.5. Katsetel kasutatud pinnasekast

Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli laboratooriumi pinnasekastis, mis on spetsiaalselt projekteeritud ja ehitatud, et viia seal läbi erinevaid geotehnilisi katsetusi. Katsetel kasutatud pinnasekasti kujutab joonis 2.7.



**Joonis 2.7.** Katsetel kasutatud pinnasekast

Katsekast oli täidetud liivaga ning kasti laius oli 2 meetrit ja pikkus 3,5 meetrit. Liivakasti kohal paiknes terasprofiilidest raam. Raami horisontaalse tala asukohta on võimalik muuta. Raam on arvutatud vastu võtma suuremaid jõudusid kui antud katsetes rakendatakse.

### 2.4. Katsetel kasutatud koormamis- ja mõõtmisseadmed

Vaiade tõmbekatseid viidi läbi hüdraulilise silindriga BVA HC1203XT (vt joonis 2.8.), millel oli piki silindrit läbiv auk. Silindri maksimaalne jõud oli 120 kN ning silindri käik 75 mm. Tänu silindrit läbivale augule õnnestus silinder tööle rakendada tõmbele.

Hüdraulilist silindrit survestati BVA P1000 käsipumbaga, mille maksimaalne jõud oli 130 kN (vt joonis 2.9.).



**Joonis 2.8.** Katsetel kasutatud hüdrauliline silinder BVA HC1203XT



**Joonis 2.9.** Katsetel kasutatud hüdrauliline käsipump BVA P1000

Katseandmed salvestati ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestussüsteemiga, mis mõõtis ja salvestas maapinna siirdeid, vaia siirdeid ning rõhku silindris. Andmesalvestusseade on näidatud joonisel 2.10.



**Joonis 2.10.** Andmesalvestussüsteem ALMEMO 5690-2 AHLBORN



Silindrirõhku mõõdeti surveanduriga AHLBORN FD8214 (vt joonis 2.11.), anduri mõõtmisviga on  $\pm 0,5\%$ . Maapinna tõusu ja vaia siiret mõõdeti siirdeanduriga FWA150-T, mille mõõtmistäpsus on  $\pm 0,01$  mm (vt joonis 2.12).



**Joonis 2.11.** Silindri rõhuandur AHLBORN FD8214

Maapinna tõusu mõõtmiseks tuli siirdeandurid paigaldada täiesti eraldiseisva plangu külge, et tagada andurite stabiilsus ja täpsed tulemused.



**Joonis 2.12.** Siirdeandurid FWA150-T

Katsekehadeks olid nii labadeta kui labadega vaiad, seetõttu oli vaiade maa sisse süvistamine erinev. Labadeta vaiad rammiti maa sisse, kasutades 10 kg kaaluvat vasarat. Järgneval joonisel 2.13. on kujutatud rammimiseks kasutatud vasarat.



**Joonis 2.13** Rammimisel kasutatud 10 kg kaaluv vasar

Pinnase vastupanu mõõtmiseks lasti vasaral kukkuda mööda juhtvarrast 0,6 meetri kõrguselt kolm korda vaiale ning seejärel mõõdeti vaia siire. Antud protseduuri korrati iga vaia puhul kolm korda. Kuna labadega vaiu kruviti maa sisse, siis pinnase vastupanu mõõtmiseks kasutati väändevõtit DREMOMETER DR  $\frac{3}{4}$ " 140–760 Nm. Väändevõtit on kujutatud joonisel 2.14.



**Joonis 2.14.** Väändevõti DREMOMETER DR  $\frac{3}{4}$ " 140–760 Nm

Väändevõti andis tulemusi 100 ja 150 mm diameetriga labadega kruvivaiade puhul, tulemused varieerusid 200...500 Nm vahel. Kuna 50 mm diameetriga labadega vaia tulemused jäid alla väändevõtme skaala, siis neid näitajaid ei õnnestunud fikseerida.

## 2.5. Katseplaan

Laboratoorne katseplaan sisaldas kokku 22 katset (vt tabel 2.2.). Katsed olid jagatud kolme gruppi. Esimene grupp koosnes 10-st üksikvaia tõmbekatsest, kus uuriti vaia nurga mõju kande võimele. Teine grupp katseid koosnes kaheksast nurga all oleva kahe vaia

tõmbekatses, kus uuriti kahe vaia koosmõju erinevate nurkade all. Esimese ja teise grupi katsetes olid katsekehad maapinna suhtes kas 60- või 75-kraadise nurga all. Kolmas grupp koosnes neljast kahe vertikaalse vaia tõmbekatses, kus uuriti vaiade vahekauguse mõju kandevõimele.

**Tabel 2.2.** Laboratoorsed katsed

Grupp	Katse nr	Katsekeha kirjeldus	Nurk maapinna ja vaia vahel, °	Kahe vaia vahekaugus, mm
I Uuritakse nurga mõju kandevõimele	1.	Sile vai	75	–
	2.	Ribilise pinnaga vai	75	–
	3.	50 mm diameetri labaga vai	75	–
	4.	100 mm diameetri labaga vai	75	–
	5.	150 mm diameetri labaga vai	75	–
	6.	Sile vai	60	–
	7.	Ribilise pinnaga vai	60	–
	8.	50 mm diameetri labaga vai	60	–
	9.	100 mm diameetri labaga vai	60	–
	10.	150 mm diameetri labaga vai	60	–
II Uuritakse kahe vaia koosmõju erinevate nurkade all	11.	2 x sile vai	75	–
	12.	2 x ribilise pinnaga vai	75	–
	13.	2 x 50 mm diameetri labaga vai	75	–
	14.	2 x 100 mm diameetri labaga vai	75	–
	15.	2 x sile vai	60	–
	16.	2 x ribilise pinnaga vai	60	–
	17.	2 x 50 mm diameetri labaga vai	60	–
	18.	2 x 100 mm diameetri labaga vai	60	–
III Uuritakse vaiade vahekauguse mõju	19.	2 x 50 mm diameetri labaga vai	–	400
	20.	2 x 100 mm diameetri labaga vai	–	400
	21.	2 x 50 mm diameetri labaga vai	–	800
	22.	2 x 100 mm diameetri labaga vai	–	800

### 2.5.1. Vaiade süvistamine

Olenemata vaia tüübist kaevati pinnasekast 0,7 m sügavuseni lahti ning pinnas tihendati kihiti 0,7, 0,4 ja 0,1 meetri sügavuselt tamperiga. Peale pinnase tihendamist ning silumist süvistati labadeta vaiad vasara abil kuni 80 cm ulatuses maa sisse. Kõiki nurga all vaiu süvistatakse šablooni abil (vt lisa 1. joonis 1.1.). Katsevaia 80 cm piiril lasti 10-kilosel vasaral kukkuda 0,6 m kõrguselt vaiadele kolm korda ning seejärel mõõdeti vaiade siire. Seda protseduuri korrati kolm korda, et saada teada pinnase vastupanu. Peale kolme vastet rammiti vai meetri ulatuses lõpuni maa sisse.

Labadega vaiad keerati maa sisse spetsiaalse meetripikkuse terasest vaiavõtmega (vt lisa 1. joonis 1.2.). Katsevaiad keerati 95 cm ulatuses maa sisse ning seejärel mõõdeti pinnase vastupanu väänevõtmega. Väänevõtmel suurendati väänet seni kui vaiale võtit rakendades käis klõps. Pärast vastet kruviti vaiad meetri ulatuses maa sisse.

### **2.5.2. Katsegrupid**

Esimese grupi katsed koosnesid üksikvaia tõmbekatsetest. Pärast vaia maa sisse süvistamist paigaldati vaia ümber maapinna tõusu mõõtvad siirdeandurid. Maapinna suhtes 75-kraadise nurga all oleva vaia siirdeandurite kaugused olid kummalegi poole 10, 20, 30, 40 ja 50 cm. Kuna maapinna suhtes 60 kraadi all oleva vaia nurk oli suurem, tuli andureid nihutada 10 cm edasi: 20, 30, 40, 50 ja 60 cm kaugusele kummalegi poole. Järgmiseks ühendati vai katseseadmega ning seejärel kontrolliti üle kõik mõõte- ja katseseadmed. Testkatseid ja varasemaid tulemusi analüüsides üritati ette arvata võimalikku piirkoormust, mida kümnega jagades saadi koormusaste. Igal koormusastmel fikseeriti vaia siirdeanduri näit 1, 3, 7 ja 10 minuti möödumisel. Katset jätkati seni kui katsevai ei suutnud enam lisatavat koormust vastu võtta või saavutati maksimaalne siire, 70 mm. Lõpuks ühendati vai katseseadme küljest lahti ning tõmmati maa seest välja.

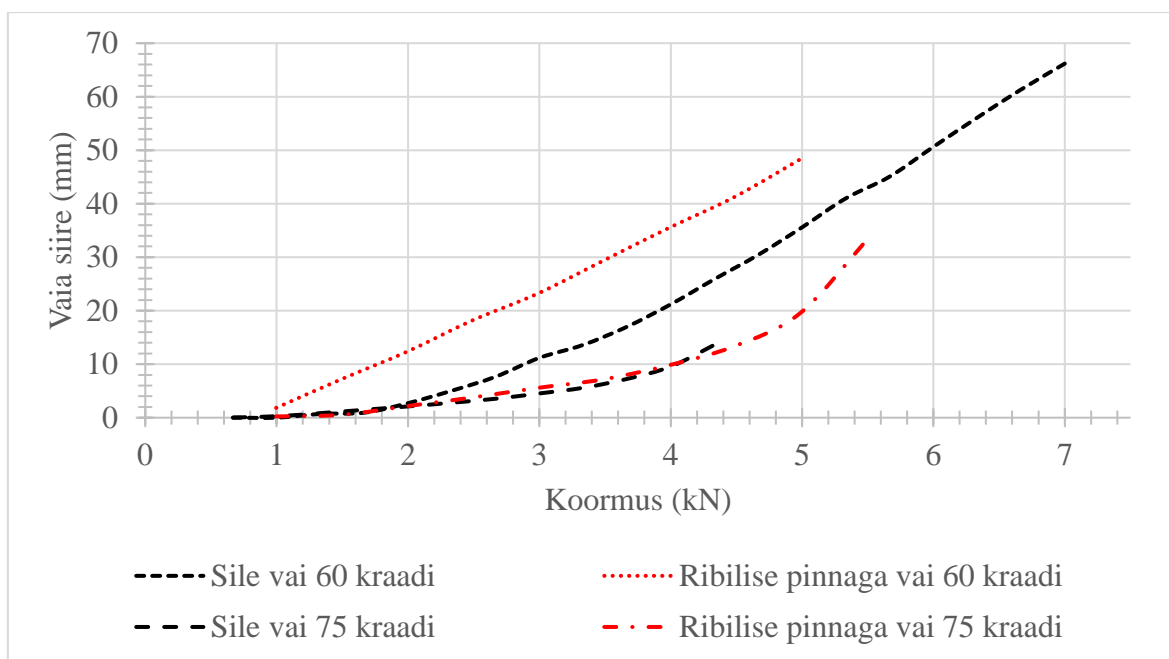
Teise grupi katsed koosnesid nurga all oleva kahe vaia tõmbekatsetest. Võrreldes esimese grupi katsetega paiknesid selles katsegrupis kõikidel katsetel siirdeandurid vaiadest kummalegi poole 20, 30, 40, 50 ja 60 cm kaugusel. Mõlemad vaiad fikseeriti omavahel koormarihmaga. Koormusastmed ja koormamine toimus täpselt samamoodi nagu esimese grupi katsete puhul.

Kolmandas katsegrupis uuriti kahe vertikaalse vaia koosmõju. Võrreldes esimese ja teise grupi katsetega ei mõõdetud selles katsegrupis maapinna tõusu, vaid mõõdeti kahe vaia siiret eraldi. Koormamisel loeti katse lõppenuks kui katsevai ei suutnud enam lisatavat koormust vastu võtta või saavutati maksimaalne siire (50 mm). Ülejäänud osas oli katse käik täpselt sama mis esimese grupi katsetel.

### 3. DISKUSSIOON JA TULEMUSTE ANALÜÜS

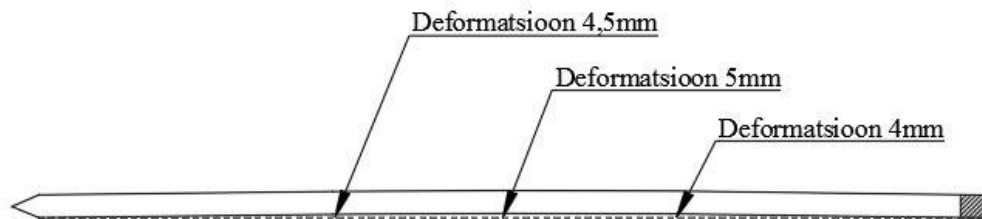
#### 3.1. Labadeta üksikvaiade katsetulemused

Neljast katsest ebaõnnestus üks ribilise pinnaga vaia katse, kuna katseseadmel sai silindrikäik otsa, ei saadud kätte maksimaalset piirkoormust. Tegemist oli esimese 60-kraadise vaia katsega ning pärast katset reguleeriti tõmbemehhanism ümber pikemale silindrikäigule. Alljärgneval joonisel 3.1. on kujutatud nelja labadeta vaia katsetulemusi.



**Joonis 3.1.** Labadeta üksikvaiade tõmbekatse tulemused

Jooniselt selgub, et 60-kraadise nurga all olevate vaiade siirded olid oluliselt suuremad kui 75 kraadi all olevate vaiade siirded. Sile vai 60-kraadise nurga all andis kõige suurema piirkoormuse, mille tulemusena tekkis ka vaiale jääkdeformatsioon (vt joonis 3.2.). Erinevate vaiade käitumisele hinnangu andmisel selgus, et 60-kraadiste vaiade jooned on kuni piirkoormuse saavutamiseni lineaarsed. 75-kraadised vaiad kaotavad oma lineaarsuse umbes 60% piirkoormuse juures. See tähendab, et 60-kraadiste katsevaiade roomepiir on 90% piirkoormuse juures ning 75-kraadiste vaiade roomepiir 60% piirkoormuse juures. Edaspidises analüüsis ribilise pinnaga 60-kraadist vaia ei käsitleta.

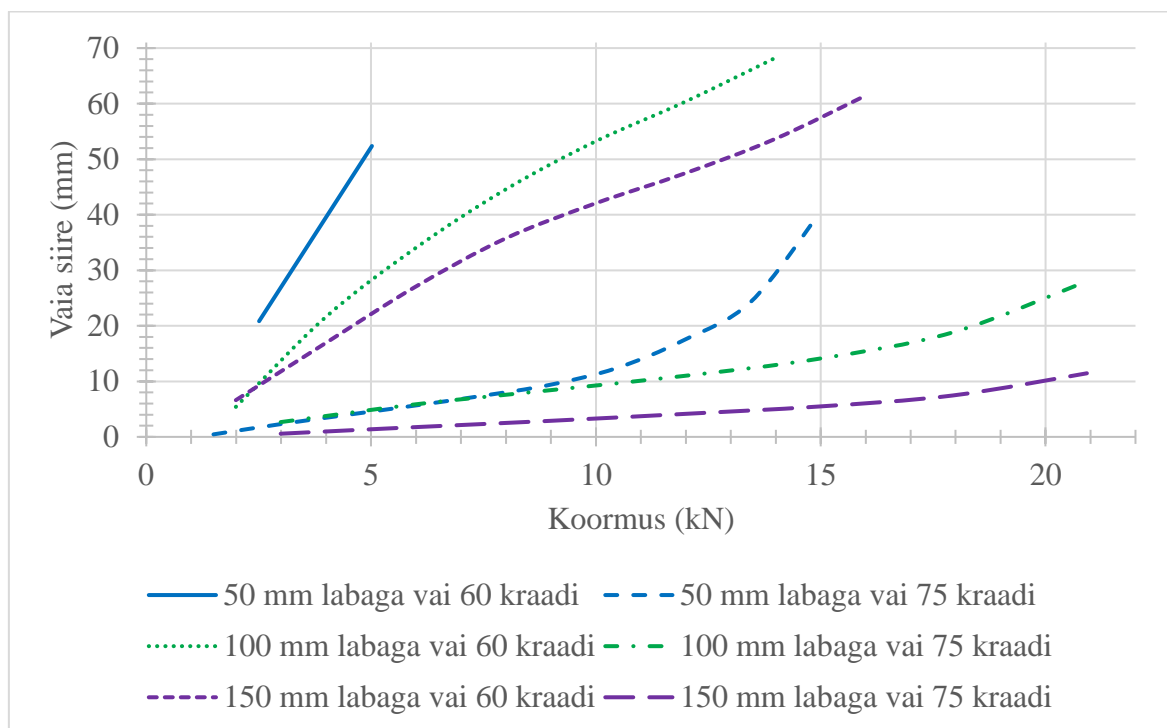


**Joonis 3.2.** Sileda katsevaia jääkdeformatsioon pärast 60-kraadist tõmbekatset

Sileda katsevaia väljatõmbamisel selgus, et vaiale on tekkinud jääkdeformatsioon, mis oli selgelt eristatav. Katsevaia nurga all maa seest välja tõmmates tekkis vaia paindemoment. Kui paindemoment ületab materjali elastsuspiiri, siis tekivad jääkdeformatsioonid. Deformatsiooni mõõdeti vaia alumisest otsast 35 cm kauguselt 4,5 mm, vaia keskelt 5 mm ning 70 cm kauguselt 4 mm.

### 3.2. Labadega üksikvaiade katsetulemused

Labadega katsevaiad andsid oluliselt paremaid tulemusi kui labadeta vaiad. Kruvivaiade katsetulemusi on kirjeldatud joonisel 3.3.



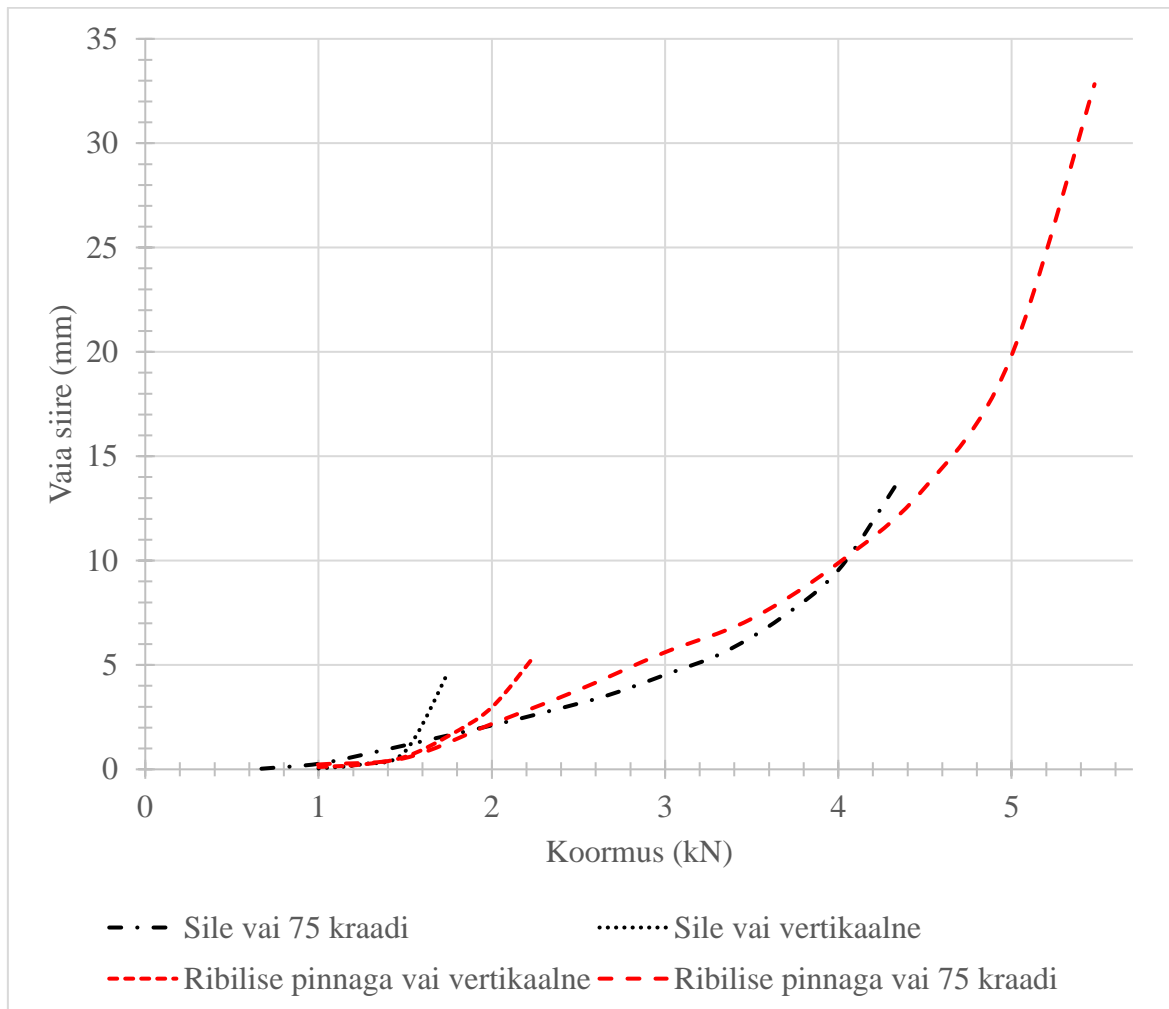
**Joonis 3.3.** Labadega üksikvaiade tõmbekatse tulemused

60-kraadiseid ja 75-kraadiseid vaiu joonisel võrreldes selgub, et 60-kraadise ja 75-kraadise nurga all olevad vaiad käituvad täiesti erinevalt. 75-kraadise nurga all olevad vaiad käituvad tüüpilise vaia kandevõime graafiku järgi, kus roomepiiri ületades hakkavad deformatsioonid järsult suurenema. 50 mm labaga vaia roomepiir on 12 kN, 100 mm ja 150 mm labaga vaial 19 kN. 60 kraadi all olevatel vaiadel hakkab koormuse kasvades hoopis deformatsioon vähenema. See tähendab, et vai töötab hoopis teisiti, tõenäoliselt on see tingitud sellest, et vai töötab paindele ja pinnas järjest tiheneb takistades painet. Ka vaia laba võib takistada pöördumist. Võrreldes deformatsioone 10 kN juures, on näha, et 75-kraadistel vaiadel jääb deformatsioon alla 12 mm, kuid 60-kraadistel vaiadel oli deformatsioon 45...55 mm. 50 mm labaga 60-kraadise nurga all olev vai 10 kN koormuseni ei jõudnud. Kokkuvõtvalt võib väita, et 60-kraadiste vaiade deformatsioonid on kõvasti suuremad.

### **3.3. Vertikaalsete ja nurga all olevate vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus**

Paralleelselt käesoleva magistritööga teostati teise magistritöö raames katseid samade katsekehadega, milles uuriti vaiade vertikaalset tõmbekandevõimet. Nimetatud uurimistöö autor on Kuido Kangur ning töö pealkiri „Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring“. Kanguri katsete tulemusi võrreldi käesolevas magistritöös nurga all olevate vaiade tõmbekatsete tulemustega.

Järgmisel joonisel 3.4. on võrreldud labadeta vertikaalsete ja 75-kraadiste vaiade katsetulemusi.

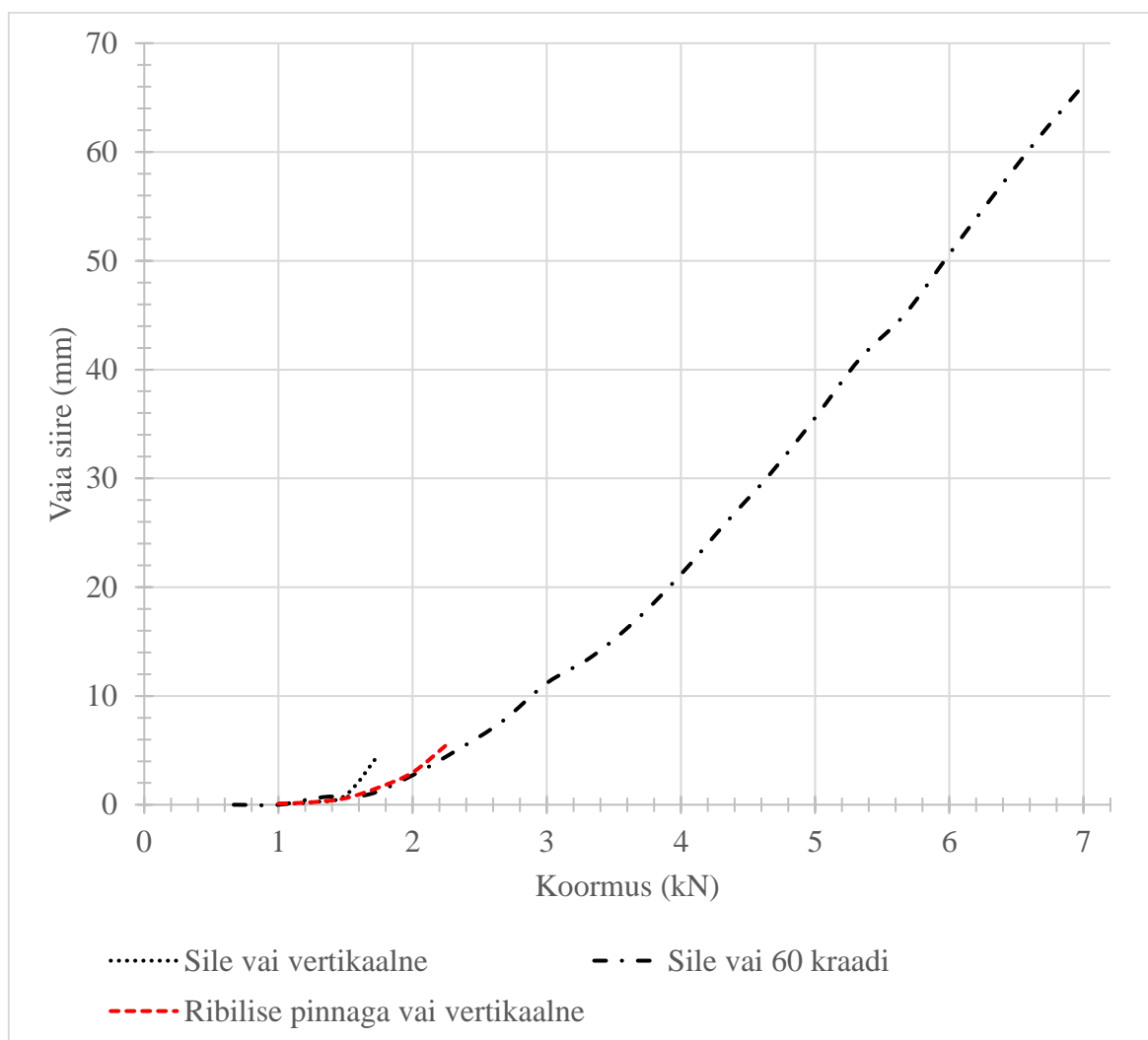


**Joonis 3.4.** Labadeta vertikaalsete ja 75-kraadiste vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Hinnates jooniselt roomepiiri, selgub, et vertikaalsete vaiade roomepiir on 1,5...1,7 kN, kuid 75-kraadistel vaiadel 3,8...4,2 kN. Jooniselt on näha, et 75-kraadise nurga all vaiad olid kandevõimelt üle kahe korra tugevamad kui vertikaalsed katsevaiad. Ka vaiade siirded olid 75-kraadiste vaiade puhul üle kahe korra suuremad. Siit järeldub, et vaia nurka maa sees muutes tekib tõmbekatsel vaia paine, mis omakorda suurendab vaia külghõõret pinnasega ning tulemuseks on suurem piirkoormus.



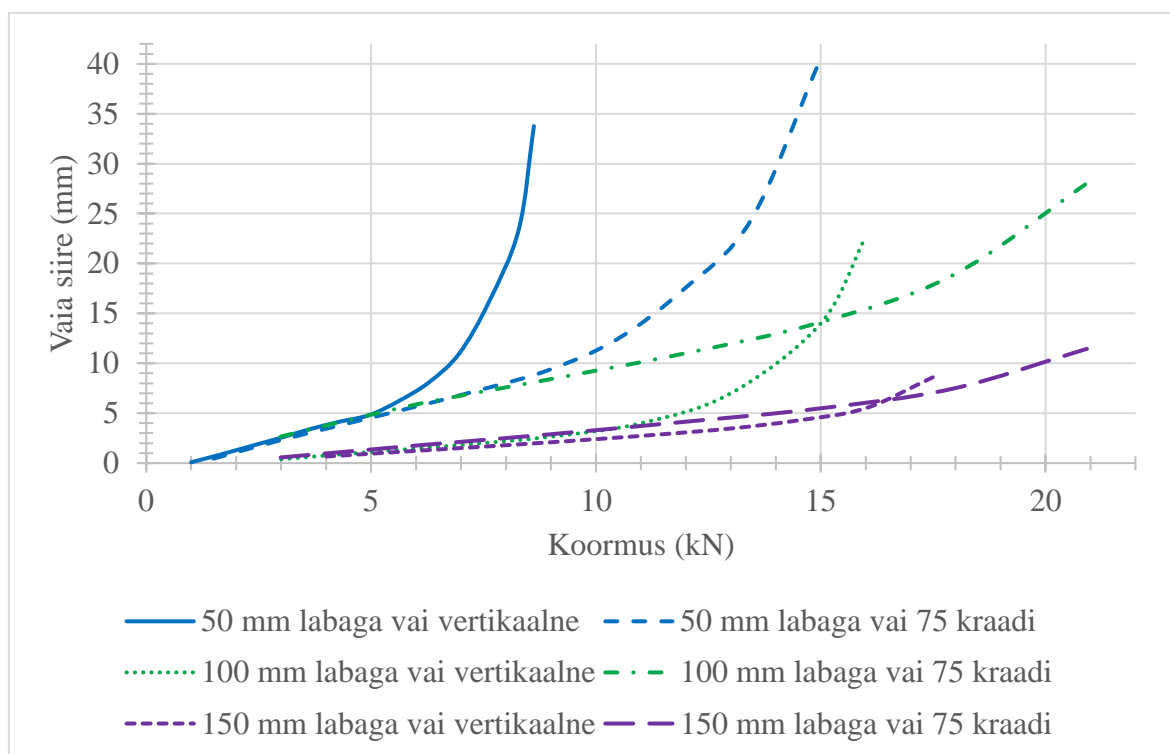
Järgmise katsetulemuste võrdlusena uuriti labadeta 60-kraadiseid ja vertikaalseid katsevaiu. Katsetulemused kajastuvad joonisel 3.5.



**Joonis 3.5.** Labadeta vertikaalsete ja 60-kraadiste vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Piirkoormus on 60-kraadisel siledal vaial neli korda suurem kui vertikaalsel ribilise pinnaga vaial. Vaia siire on nurga all oleval vaial üle kümne korra pikem kui vertikaalsel vaial. Siit järeldub, et nurga all olev vai võtab vastu kõvasti rohkem koormust kui vertikaalne, kuid seejuures on ka vaia siire väga pikk. Arvatavasti võib 60-kraadise nurga all oleva sileda vaia suure piirkoormuse põhjustada vaia küljele mõjuv pinnase surve, mis tekib katsekeha maa seest nii suure nurga alt välja tõmmates.

Järgmisel joonisel 3.6. on kirjeldatud labadega 75-kraadiste vaiade ja vertikaalsete vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus.

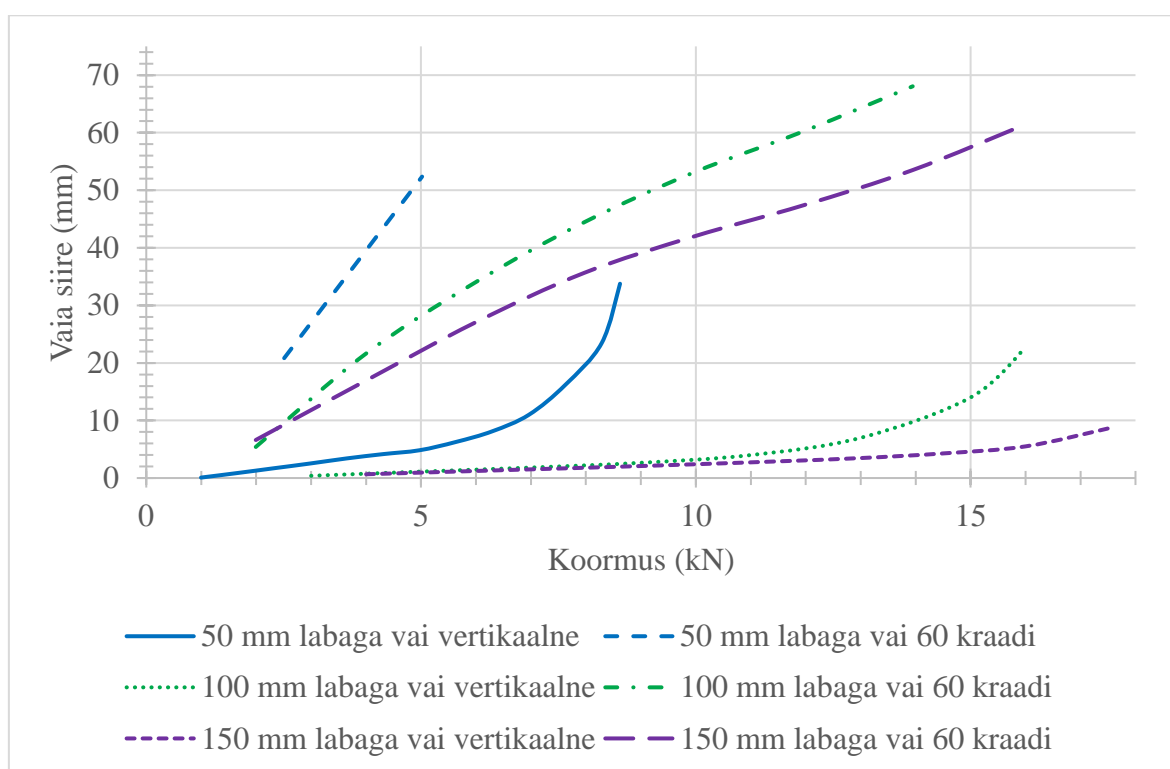


**Joonis 3.6.** Labadega vertikaalsete ja 75-kraadiste kruvivaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Jooniselt on näha, et kõige suuremad vaia siirded olid 50 mm labaga vai korral, kus 75-kraadise nurga all olev vai andis 7 mm pikema siirde kui vertikaalne vai. Piirkoormus 75-kraadise nurga all oleval vaial oli 40% suurem kui sama labaga vertikaalsel kruvivaial. Võrreldes 100 mm labaga vertikaalset ja 75-kraadise nurga all olevat kruvivaia on näha, et 75-kraadise vaia siire on 4 mm pikem kui vertikaalsel vaial ning piirkoormus 25% suurem kui vertikaalsel vaial. Vaia siire 150 mm labaga 75-kraadisel vaial on 3 mm pikem kui vertikaalsel vaial ning piirkoormus on 20% suurem kui vertikaalsel vaial. Kokkuvõtvalt oli 75-kraadistel kruvivaiadel 20...40% suurem piirkandevõime kui vertikaalsetel kruvivaiadel ning vaiade siirded olid 75-kraadiste vaiade puhul 15...25% pikemad kui vertikaalsetel vaiadel. Analüüsides vertikaalsete vaiade kandevõimet roomepiiril, näeme, et 50 mm labaga vaia roomepiir on 6 kN, 100 mm labaga vaial 12 kN ning 150 mm labaga vaial 16 kN. 75-kraadiste vaiade roomepiirid on 50 mm labaga vaial 11 kN, 100 mm labaga vaial 17 kN ja 150 mm labaga vaial 18 kN. 75-kraadise nurga all oli 50 mm labaga vaia roomekandevõime 45% suurem, 100 mm labaga vaial 30% suurem ning 150 mm labaga vaial 10% suurem.

Tulemustest saab järeldada, et nurga all olevate vaiade kandevõime on suurem. Arvatavasti on vertikaalsete vaiade roomepiir madalam seetõttu, et vertikaalsed vaiad hakkavad kiiremini tööle tõmbetugevusele, nurga all olevad vaiad aga nihkuvad küljele enne kui hakkavad lõplikult tõmbele tööle. Kokkuvõtvalt võib öelda, et 50 mm labaga vaia kandevõime on kõige väiksem ning siire kõige suurem. 100 mm ja 150 mm labadega vaiadel on kandevõimed suuremad ning deformatsioonid väiksemad.

Järgmisel joonisel 3.7. on võrreldud labadega vertikaalseid ja 75-kraadise nurga all olevaid kruvivaiu.



**Joonis 3.7.** Labadega vertikaalsete ja 60-kraadiste kruvivaiade tõmbekatsede tulemuste võrdlus

Analüüsides joonist, selgub, et vertikaalsete ja 60-kraadiste kruvivaiade tõmbekatsede tulemusi võrdlev joonis on küllaltki erinev varasematest võrdlusjoonistest. Nimetatud joonisel on näha, et võrreldavate vaiade piirkoormused on kõige ligilähedasemad ning vaiade siirded väga erinevad. Vertikaalsed vaiad käituvad tüüpilise vaia kandevõime graafiku järgi, kus roomepiiri ületades hakkavad deformatsioonid suurenema. 60-kraadiste vaiade kandevõime suurenedes hakkas deformatsioon vähenema. Kokkuvõtvalt oli 60-kraadise nurga all olevate vaiade siire 35...85% pikem kui vertikaalsetel vaiadel ning

piirkoormus oli vertikaalsetel vaiadel 15...40% suurem kui 60-kraadise nurga all olevatel vaiadel. Siit järeldub, et vertikaalsete kruvivaiade kandevõime on suurem kui 60-kraadise nurga all olevate kruvivaiade kandevõime. Kuna 60-kraadiste vaiade puhul olid siirded ka tunduvalt suuremad, siis arvatavasti on vaia 60-kraadine nurk liialt väike, et koormusi efektiivselt vastu võtta. Jooniselt on veel näha, et vertikaalsete vaiade roomepiir on tunduvalt madalamal kui 60-kraadise nurga all olevate vaiade roomepiir – see tähendab, et vertikaalsed vaiad on oluliselt stabiilsemad.

### 3.4. Vaia arvutusliku kandevõime võrdlus katsetulemustega

Euroopa standardis „Temporary structures – Tents – Safety“ on labadeta vaiade kandevõime arvutamiseks valem, mis arvestab vaia sügavust, tüve diameetrit, vaia pikitelje ja tõmbesuuna vahelist nurka ning pinnase omadusi. Vaia kandevõimet saab arvutada alljärgneva valemiga 3.1. [17]:

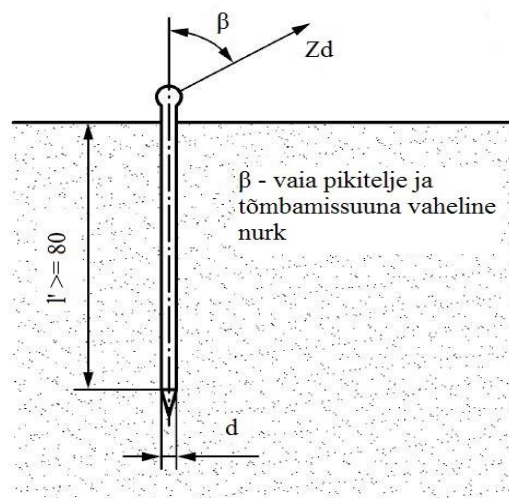
$$Z_d = f_{load} \times d \times l', \quad (3.1.)$$

kus  $Z_d$  on vaia arvutuslik kandevõime N;

$d$  – vaia tüve diameeter cm;

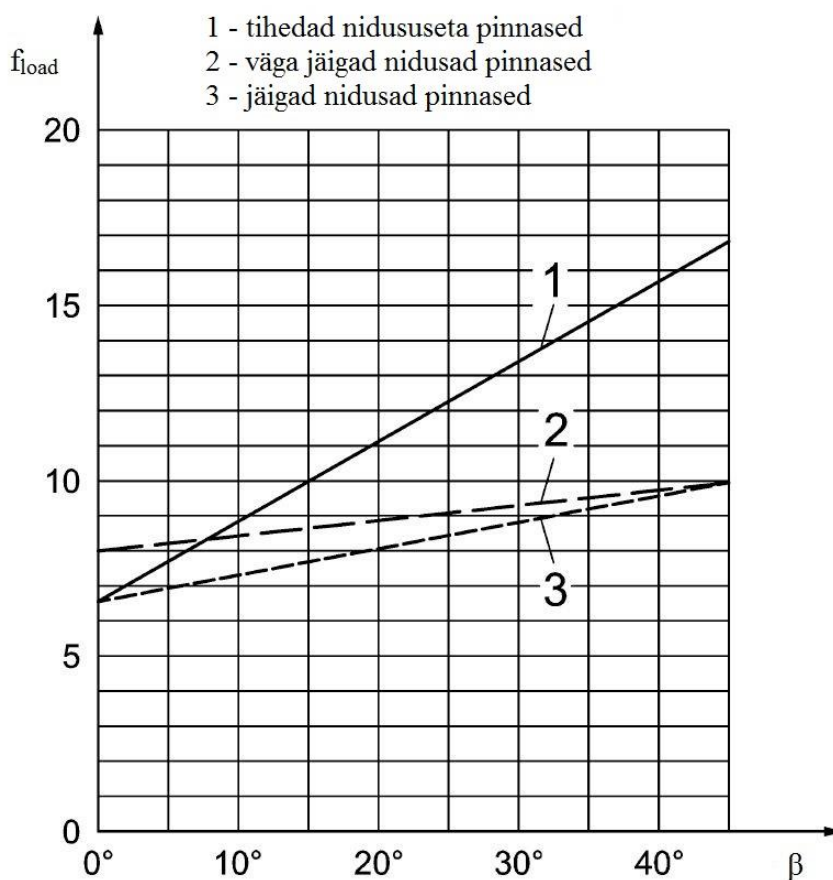
$l'$  – vaia sügavus cm;

$f_{load}$  – vaia nurka arvestav faktor (75-kraadiste vaiade puhul  $f_{load} = 10$ , 60-kraadiste vaiade puhul  $f_{load} = 13,5$ ).



**Joonis 3.8.** Vaia arvutusliku kandevõime arvutamist kirjeldav joonis [17]

Vaia nurka arvestav faktor saadi interpoleerimise teel (vt joonis 3.9.). [17]



**Joonis 3.9.** Vaia nurka arvestav faktori ( $f_{load}$ ) väärtuse interpoleerimise joonis [17]

Vaia arvutusliku kandevõime ja tegelike katsetulemuste võrdlust on kirjeldatud tabelis 3.1.

**Tabel 3.1.** Vaia arvutusliku kandevõime ja katsetulemuste võrdlustabel

Katsevai	Arvutusmodeli kandevõime $Z_d$ , kN	Katsetulemused $Z_u$ , kN	Arvutuslik katsetulemus $Z_d$ , kN ( $\gamma=1,6$ )	Erinevus arvutusmodeli ja katsetulemuse vahel
75-kraadine sile vai	2,5	4,3	2,7	1,08
75-kraadine ribilise pinnaga vai	2,5	5,5	3,4	1,36
60-kraadine sile vai	3,4	7	4,4	1,29

Arvutuslik katsetulemus  $Z_d$  arvutati alljärgneva valemiga 3.2. [17]:

$$Z_d = \frac{Z_u}{\gamma}, \quad (3.2)$$

kus  $Z_d$  on arvutuslik katsetulemus kN;

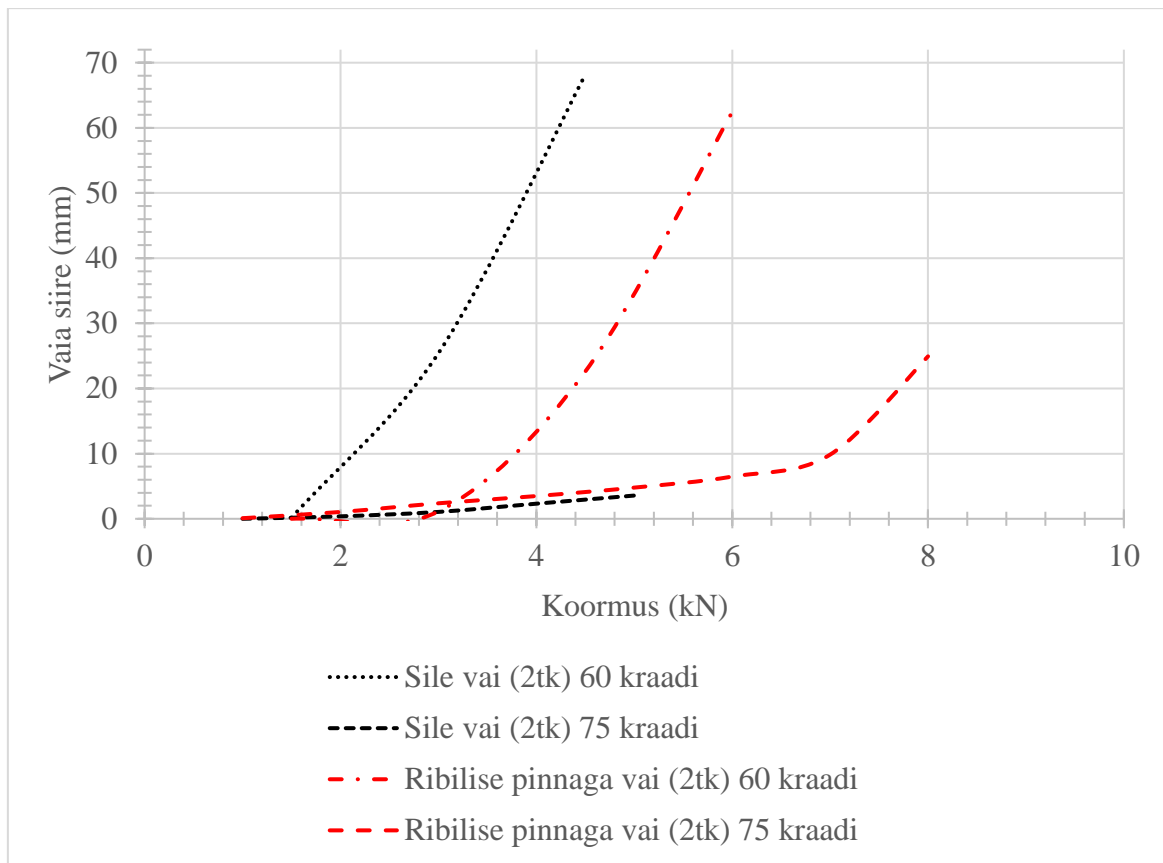
$Z_u$  – katsel saadud piirkoormus;

$\gamma$  – osavarutegur ( $\gamma = 1,6$ ).

Tabelist 3.1. on näha, et arvutuslikud vaia kandevõimed tulid tunduvalt väiksemad kui reaalsed katsetulemused. Arvutustes kasutati nidususeta pinnaste arvutusvalemit. Tulemuste suur varieeruvus võib olla tingitud sellest, et arvutusvalem ei arvesta pinnase niiskust. Samuti ei arvesta arvutusvalem vaia pinna omadusi. Katsetel kasutati ka ribilise pinnaga vaia, mille ebaühtlane pind tagas suurema hõõrdeteguri. Katsete võrdlusel esines kõige suurem erinevus vaia arvutusliku kandevõime ja katsetulemuste vahel 75-kraadise ribilise pinnaga vaia puhul.

### **3.5. Erinevate nurkade all olevate paarisvaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus**

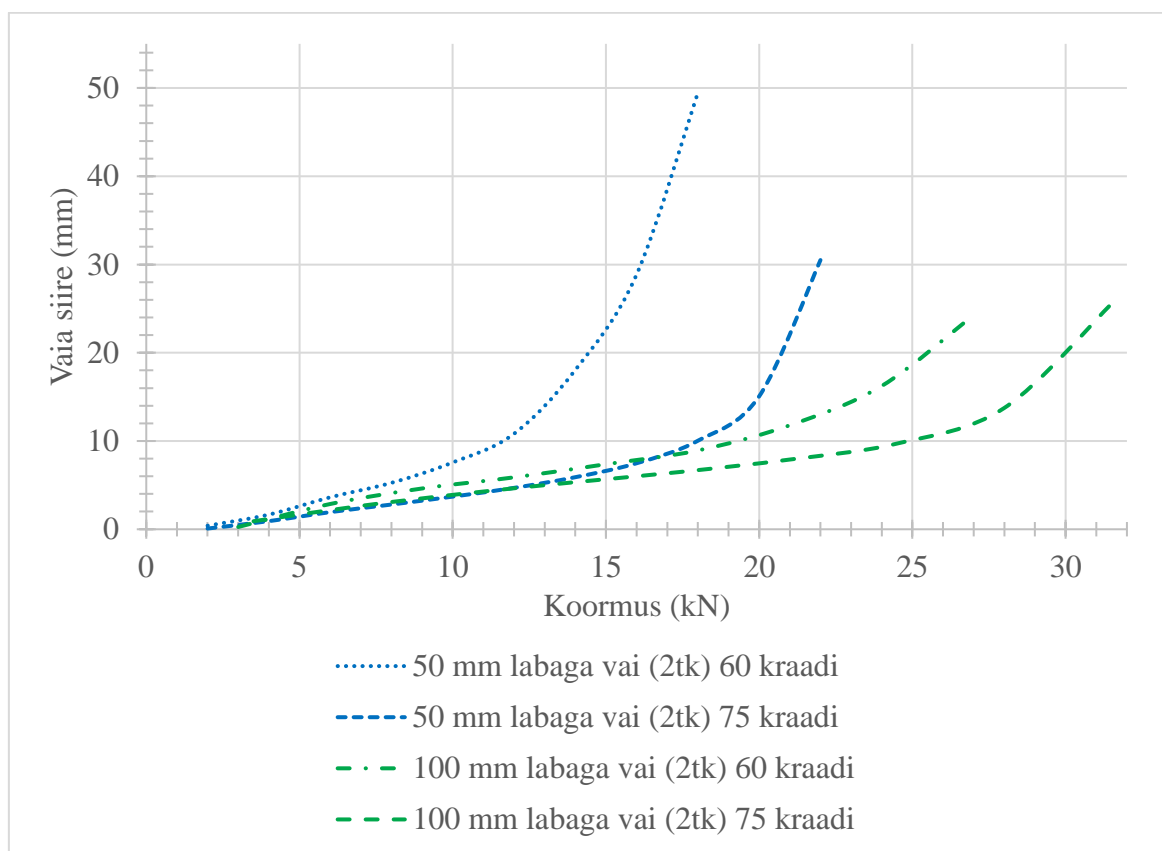
Järgmises analüüsis võrreldakse erinevate nurkade all olevaid paarisvaiu. Analüüsiti 60-kraadiste ja 75-kraadiste nurkade all olevate vaiapaaride tõmbekatsete tulemusi, mis on välja toodud alljärgneval joonisel nr 3.10.



**Joonis 3.10.** Labadeta 60- ja 75-kraadise nurga all olevate paarisvaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Hinnates roomepiire, näeme, et 60-kraadistel siledatel vaiadel on roomepiir 3 kN ning ribilistel vaiadel 4,5 kN. 75-kraadistel vaiadel on roomepiir siledal vaial 4,5 kN ning ribilise pinnaga vaial 7 kN. Sileda 75-kraadise vaia katse puhul ei kujunenud graafiku lõpp tüüpilise vaia kandevõimegraafikule sarnaselt, arvatavasti oli selle põhjuseks koormusastmete väike arv. Võrreldes deformatsioone 4 kN juures, näeme, et 60-kraadiste vaiade deformatsioonid olid kuni 10 korda suuremad kui 75-kraadistel vaiadel. Kokkuvõtvalt, labadeta 60-kraadise ja 75-kraadise nurga all olevate paarisvaiade tõmbekatsetest selgus, et paarisvaiade puhul talusid suuremat koormust 75-kraadise nurga all olevad vaiad. Vaiade siirded on 75-kraadistel vaiapaaridel väiksemad kui 60-kraadistel vaiapaaridel. Hinnates jooniselt vaiapaaride roomepiiri on näha, et 75-kraadiste vaiade roomepiir on tunduvalt suurem kui 60-kraadistel vaiadel. 75-kraadiste vaiade kandevõime on suurem, siirded väiksemad ning nad on stabiilsemad kui 60-kraadised vaiad.

Joonisel 3.11. on kirjeldatud labadega 60- ja 75-kraadise nurga all olevate paarisvaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlust.



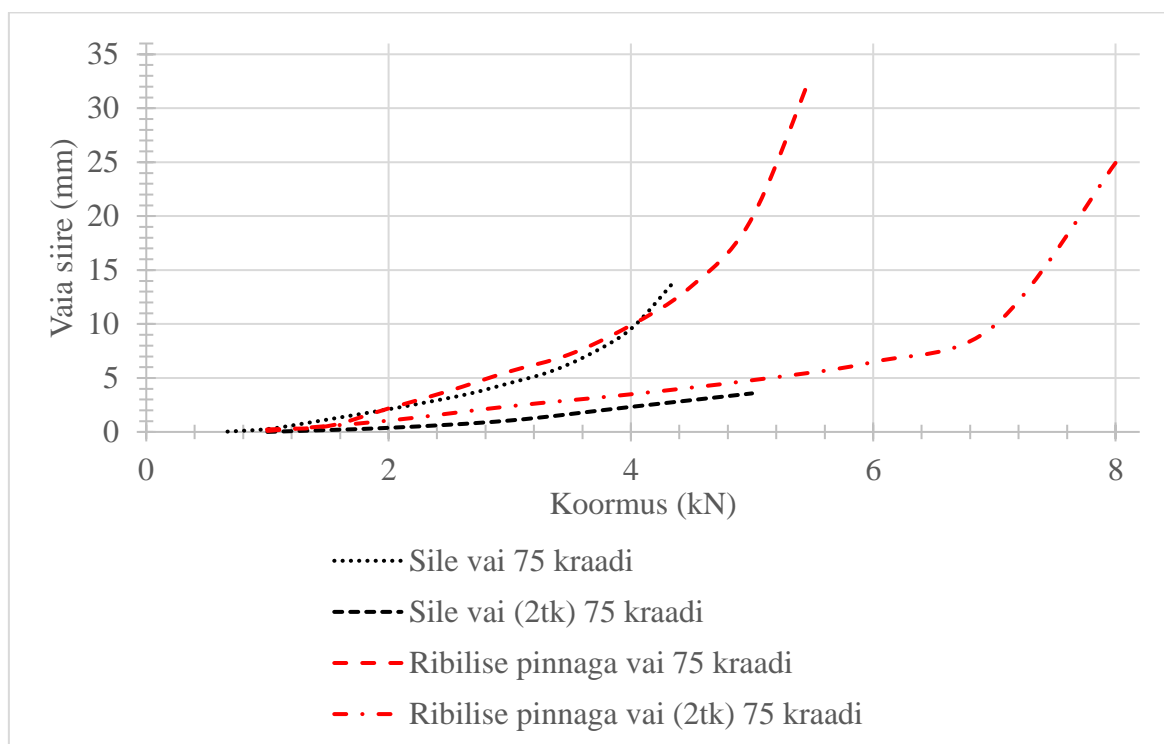
**Joonis 3.11.** Labadega 60- ja 75-kraadise nurga all olevate paarisvaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Jooniselt selgub, et 60-kraadiste vaiade roomepiir on 50 mm labadega vaiapaaril 12 kN ning 100 mm labadega vaiapaaril 20 kN. 75-kraadiste vaiade roomepiir on 50 mm labadega vaiapaaril 18 kN ja 100 mm labadega vaiapaaril 26 kN. 75-kraadised vaiapaarid näitasid paremaid tulemusi - 50 mm labadega vaiapaar 35% ning 100 mm labadega vaiapaar 25%. Võrreldes deformatsioone 12 kN koormuse juures, on näha, et 75-kraadiste vaiapaaride deformatsioonid on väiksemad kui 60-kraadistel vaiadel. Piirkoormus on 50 mm labadega 75-kraadise nurga all oleval vaiapaaril 20% suurem kui samade labadega 60-kraadisel vaiapaaril. Piirkoormus 100 mm labadega vaiade korral oli 75-kraadise nurga all 15% suurem kui 60-kraadistel vaiadel. Kokkuvõtvalt, labadega paarisvaiade puhul on 75-kraadistel vaiadel suurem roomekandevõime/piirkandevõime ja lühem siire ning nad on stabiilsemad kui 60-kraadise nurga all olevad vaiad.



### 3.6. Nurga all oleva kahe vaia ja üksikvaia tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Joonisel 3.12 on kujutatud labadeta 75-kraadise nurga all oleva kahe vaia ja üksikvaia tõmbekatsete tulemusi.

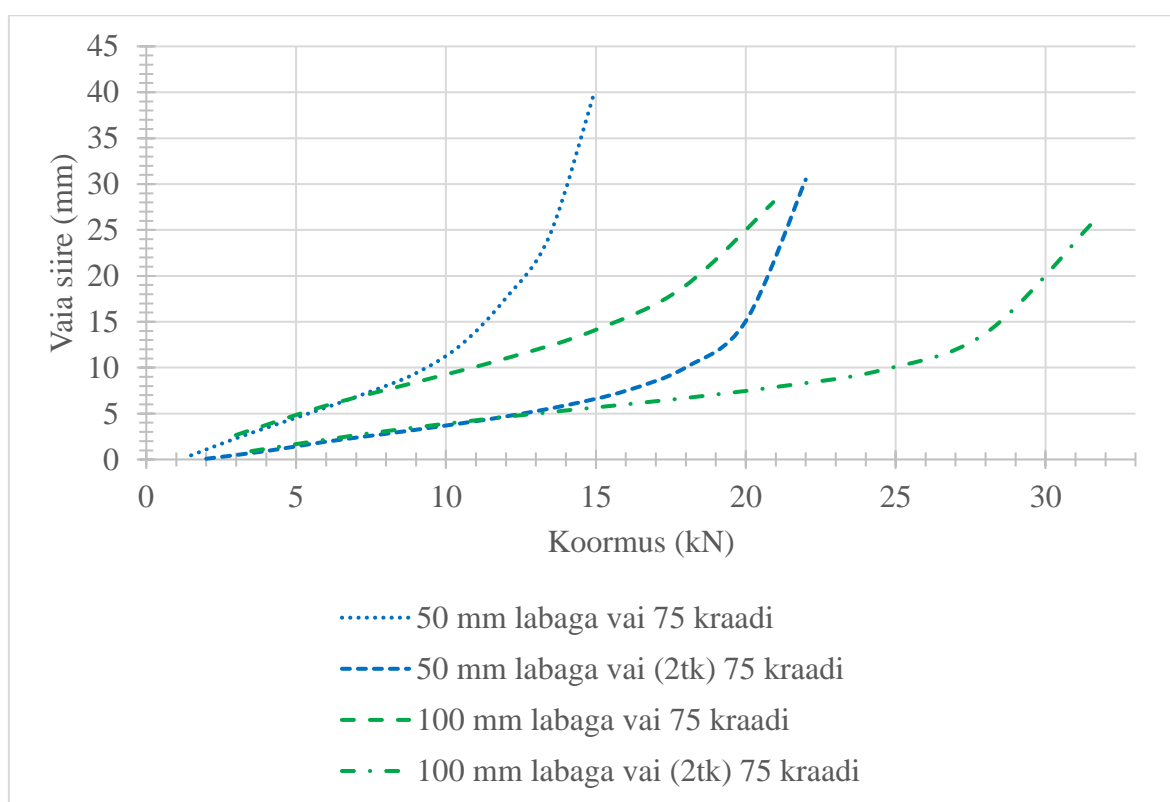


**Joonis 3.12.** Labadeta 75-kraadise nurga all oleva kahe vaia ja üksikvaia tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Jooniselt on näha, et sileda üksikvaia siire on 9 mm pikem kui siledal vaiapaaril. Piirkoormus siledal üksikvaial on 20% väiksem kui samade vaiadega vaiapaaril. Ribilise pinnaga üksikvaia puhul on vaia siire 8 mm võrra pikem kui ribilise pinnaga vaiapaaril. Piirkoormus ribilise pinnaga vaiapaaril on 30% suurem kui üksikul ribilise pinnaga vaial. Siledate vaiade siirded olid üle kahe korra väiksemad kui ribilise pinnaga vaiade siirded. Arvatavasti on see tingitud vaiade siledast pinnast, mille hõõrdetegur on väiksem võrreldes ribilise pinnaga. Analüüsides vaiade ja vaiapaaride roomepiiri, näeme, et sileda üksikvaia roomepiir on 3,8 kN ning ribilise pinnaga üksikvaia roomepiir on 4,5 kN. Paarisvaiade puhul on siledate vaiade roomepiir 4,5 kN ning ribilise pinnaga vaiade roomepiir 6,5 kN. Paarisvaiad tagasid paremad tulemused – siledate vaiade puhul 15% ja ribilise pinnaga vaiade puhul 30%. Kokkuvõtvalt olid labadeta paarisvaiad 15...30% suurema roomekandevõime ja piirkandevõimega ning väiksemate siiretega. Siit järeldub, et vaiapaarid tagavad natuke

suurema kandevõime ning lühema siirde. Vaiapaari kandevõime 15...30% suurune võit on küllaltki väike ning ilmselt on kruvivaivundamentides odavam kasutada üksikvaiu. Arvatavasti on kahe vaia väike mõju kandevõimele tingitud sellest, et vaiade tõusu takistava pinnase maht moodustab ühise osa. See ühine maht on väiksem kui kahel eraldi seisval vaial kokku. Hinnates vaiade roomepiiri selgub, et vaiapaaride roomepiir on tunduvalt suurem kui üksikvaiade roomepiir, järelikult on vaiapaarid oluliselt stabiilsemad kui üksikvaiad.

Alljärgneval joonisel 3.13. on kirjeldatud labadega 75-kraadiste nurga all oleva kahe vaia ja üksikvaia tõmbekatsete tulemuste võrdlust.



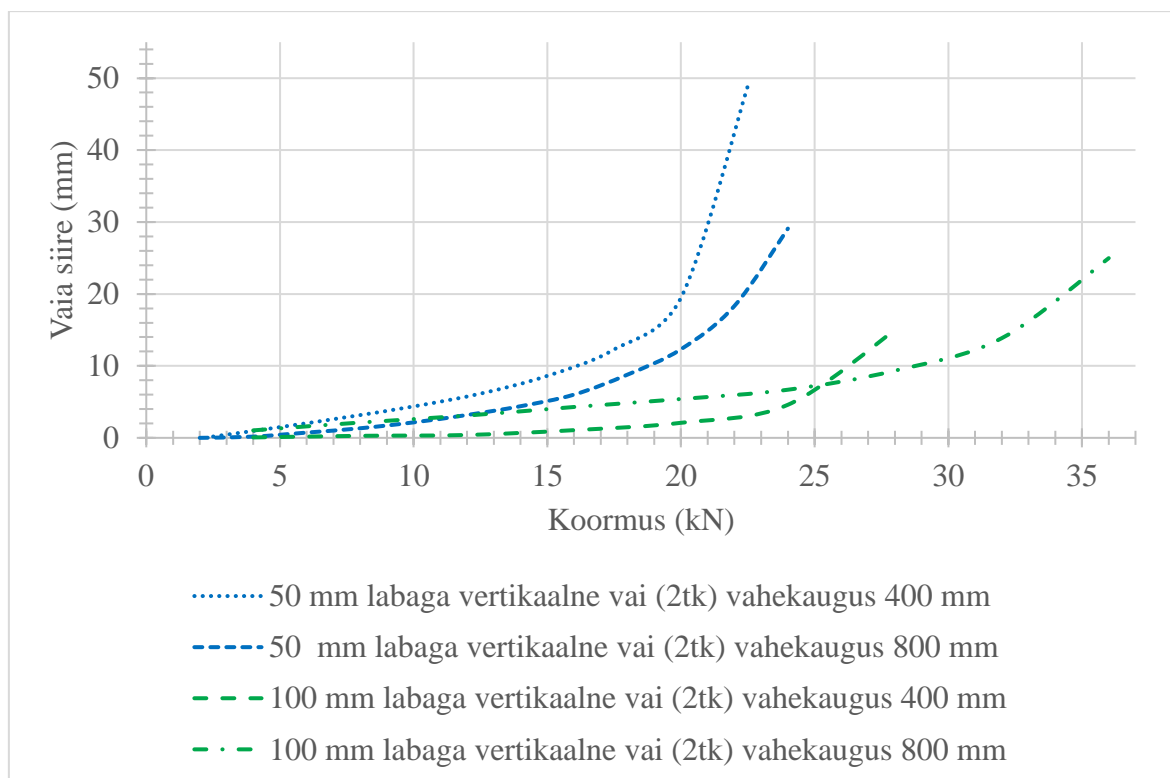
**Joonis 3.13.** Labadega 75-kraadise nurga all oleva kahe vaia ja üksikvaia tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Jooniselt selgub, et 50 mm labaga üksikvaia siire oli 9 mm pikem kui sama labaga paarisvaia siire. Vaia siire 100 mm labaga üksikvaia puhul oli 3 mm võrra pikem kui 100 mm labaga paarisvaia siire. Piirkoormus 50 mm labaga paarisvaiadel oli 30% võrra suurem kui sama labaga üksikvaial. 100 mm labaga paarisvaiade piirkoormus oli 35% suurem kui 100 mm labaga üksikvaia puhul. Analüüsides vaiade roomepiiri selgub, et 50 mm labaga üksikvaia roomepiir on 10 kN, 100 mm labaga üksikvaial 17 kN. Paarisvaiade korral on 50 mm labaga

vaiade roomepiir 17 kN ning 100 mm labaga vaiadel 26 kN. Seega andsid vaiapaarid paremaid tulemusi – 50 mm labaga vaiapaar 40% ning 100 mm labaga vaiapaar 35%. Kokkuvõttes talusid paarisvaiad 30...40% suuremat koormust ning paarisvaiade siirded olid väiksemad. Järelikult tagavad paarisvaiad suurema kandevõime ning suurema stabiilsuse.

### 3.7. Vertikaalsete vaiade erinevate vahekauguste tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Joonisel 3.14. on kirjeldatud vertikaalsete vaiade erinevate vahekauguste tõmbekatsete tulemuste võrdlust.

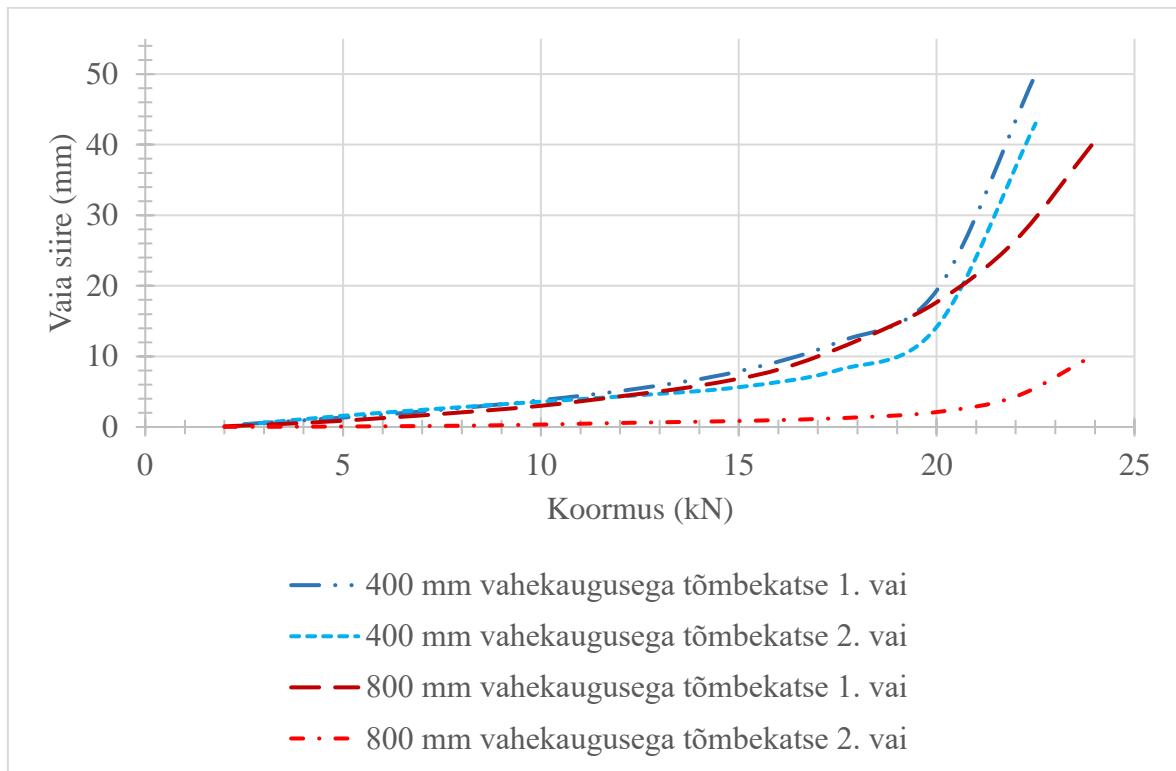


**Joonis 3.14.** Vertikaalsete vaiade erinevate vahekauguste tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Piirkoormus 50 mm labaga kruvivaiadel oli 800 mm vaiade vahekauguse puhul 10% suurem kui 400 mm vahekaugusel. 100 mm labaga vaiadel oli samuti 800 mm vahekauguse puhul kandevõime suurem kui 400 mm vahekaugusel – 15%. Vaia siirded olid 50 mm labadega vaiade puhul 400 mm vahekauguse puhul pikemad ning 100 mm labaga vaiade puhul 800 mm vahekauguse puhul pikemad. Rohkem koormust suutsid taluda 800 mm

vahekaugusega kruvivaiad. Suurema vahekaugusega vaiad suudavad rohkem koormust taluda seetõttu, et kruvivaiade väljatõmbel vastu töötavate pinnaste hulgas ühilduvad väga vähesel määral või ei ühildu üldse. Jooniselt selgub, et vaiade kõverad on küllaltki võrdses ulatuses lineaarsed, seega roomepiiri osas olulisi erinevusi ei esine. Võrreldes vaiade siirdeid roomepiiril, on näha, et kõige suurem siire oli 50 mm labadega vaiadel 400 mm vahekauguse juures ning kõige väiksem 100 mm labadega vaiadel 400 mm vahekaugusel. Siit järeldades, 100 mm diameetriga laba tagab roomepiiril väiksema siirde kui 50 mm diameetriga laba.

Vertikaalsetel kahe vaia katsetel kasutati nelikanttoru (vt joonis 2.6. lk 30), mille mõlemas otsas oli vaia siiret mõõtev andur. Alljärgneval joonisel 3.15. on kujutatud 50 mm labaga erinevate vahekaugustega vertikaalsete vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlust.

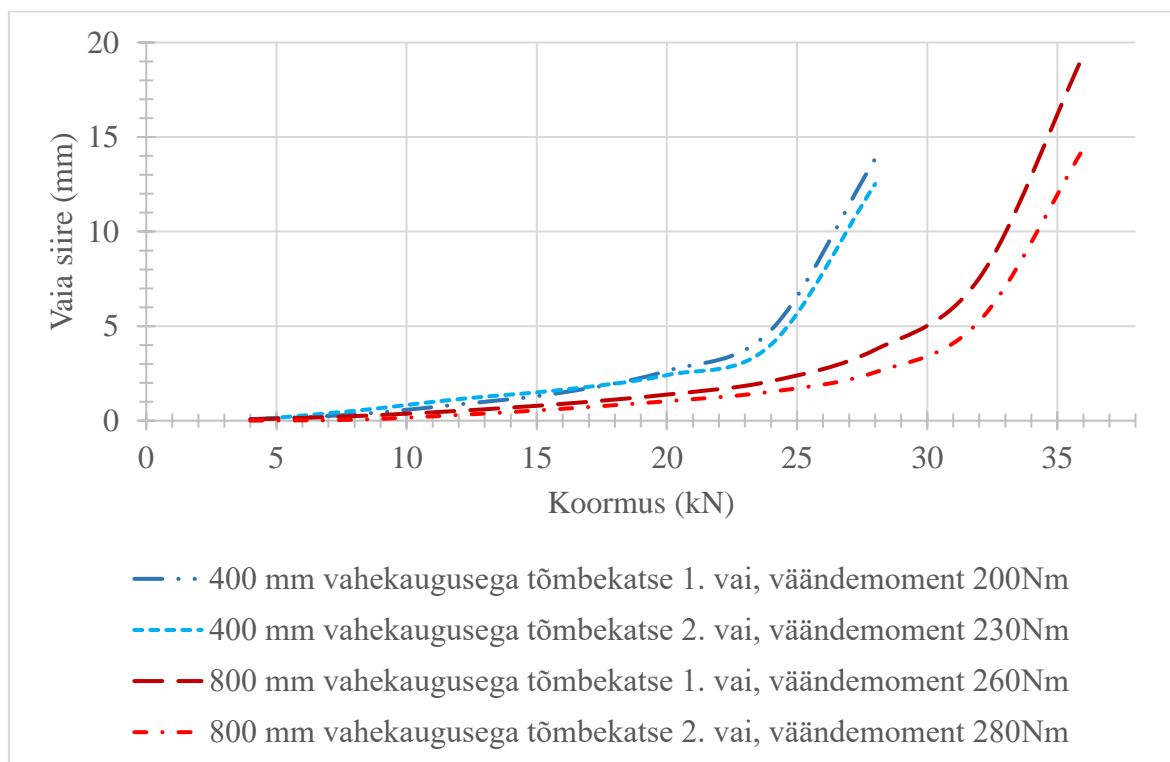


**Joonis 3.15.** 50 mm labaga erinevate vahekaugustega vertikaalsete vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Jooniselt on näha, et piirkoormus oli 800 mm vahekauguse puhul suurem kui 400 mm vahekaugusel. Antud joonise põhjal saab järeldada, et esimene vai kaotas oma kandevõime varem, kuna vaiade siirded olid kõvasti suuremad kui teistel vaiadel. Vaiade vahekaugust suurendades suurenevad vaiade siirete erinevused. Hinnates vaiade tõmbekatse roomepiiri,

on näha, et 50 mm labaga kruvivaiade puhul jääb mõlemal vahekaugusel roomepiir vahemikku 19...20 kN, seega vahekaugust suurendades roomepiiris suuri erinevusi ei ole.

Järgmisel joonisel 3.16. on kujutatud 100 mm labaga erinevate vahekaugustega vertikaalsete vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlust.



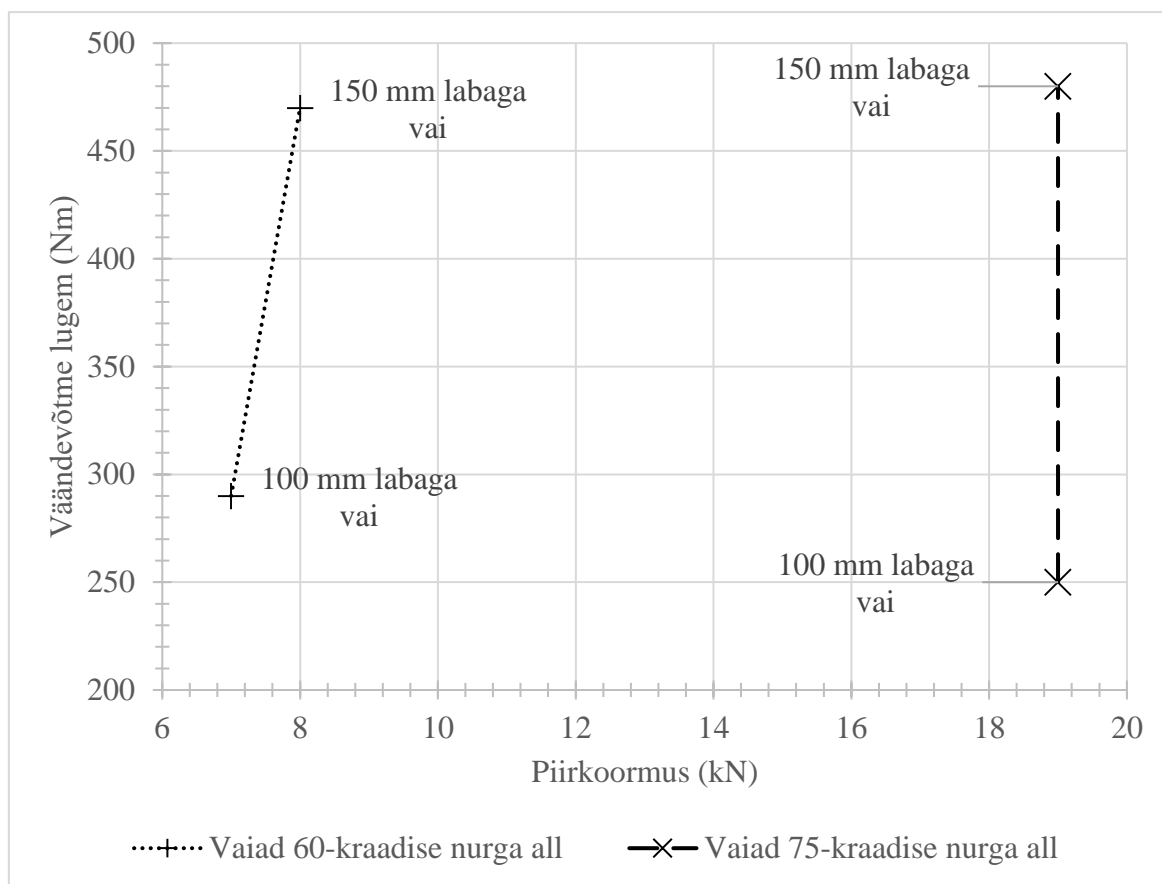
**Joonis 3.16.** 100 mm labaga erinevate vahekaugustega vertikaalsete vaiade tõmbekatsete tulemuste võrdlus

Vaiapaari piirkoormus oli suurem vaiade 800 mm vahekauguse korral. Joonise põhjal saab järeldada, et esimene vai kaotas mõlema katse korral kandevõime varem kui teine katsevai. 100 mm labaga kruvivaiade maa sisse keeramisel mõõdeti väändevõtmega pinnase vastupanu. 400 mm vahekaugusel oli esimese vaia väändemoment 200 Nm ning teise vaia väändemoment 230 Nm. Vaiade väändemomendid 800 mm vahekaugusel olid esimesel vaial 260 Nm ning teisel vaial 280 Nm. Olenemata vahekaugusest oli esimese vaia väändemoment mõlema katse korral väiksem. Kõrvutades joonist ja vaiade väändemomente võib väita, et väiksema väändemomendiga vaial on suurem siire ning tõenäoliselt kaotas ta oma kandevõime varem kui suurema väändemomendiga vai. Analüüsides vaiade roomepiire, selgub, et 400 mm vaiade vahekauguse puhul oli roomepiir 23 kN ning 800 mm

vahekaugse puhul 30 kN. 800 mm vahekauguse roomepiir oli 25% suurem kui 400 mm vahekaugusel. Siit järeldades, vaiade 800 mm vahekaugus tagab suurema roomepiiri.

### 3.8. Väändevõtme ja vaia kandevõime vaheline seos

Kruvivaiade maa sisse keeramisel mõõdeti väändevõtmega pinnase vastupanu. Joonisel 3.17. on kujutatud pinnase vastupanu ja vaia kandevõime vahelist seost.

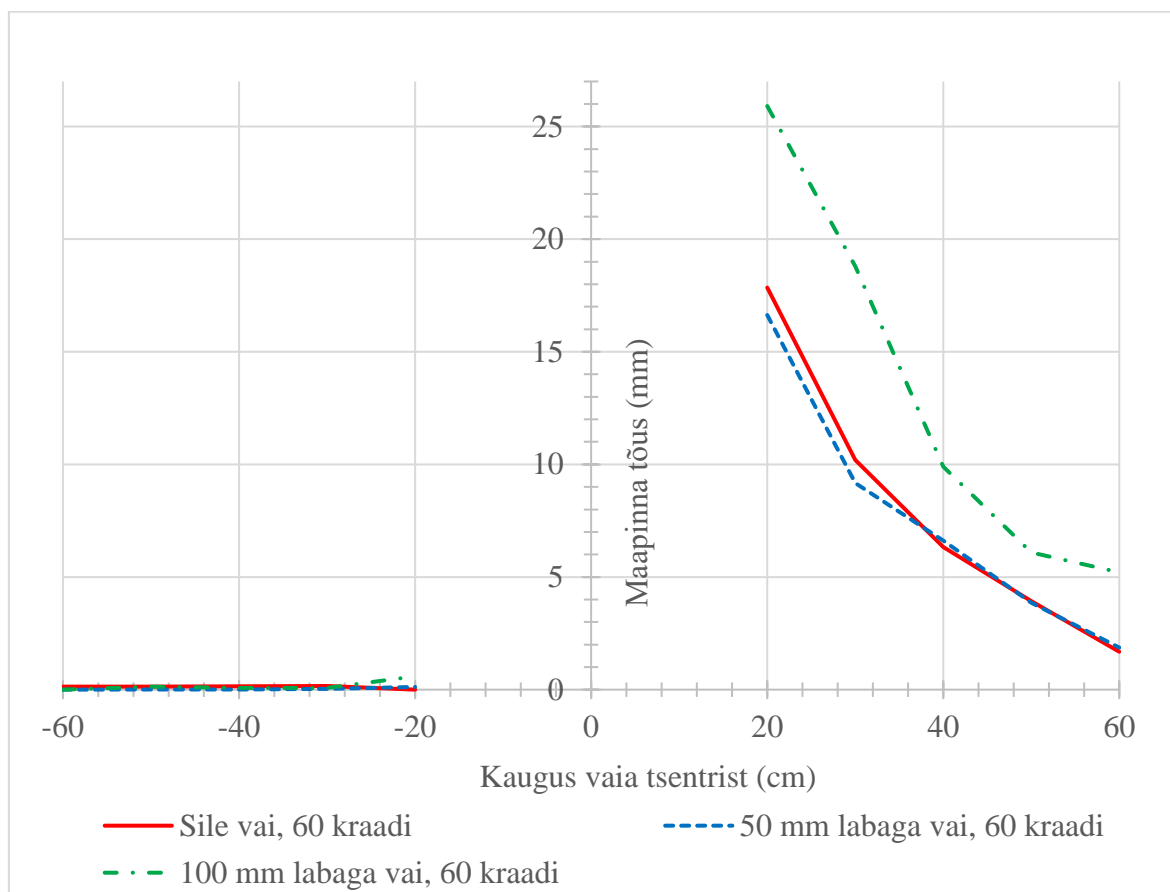


**Joonis 3.17.** Pinnase vastupanu ja vaia kandevõime vaheline seos

Jooniselt on näha, et 60-kraadisel 100 mm labaga vaia väändemoment on 280 Nm ning 150 mm labaga vaia väändemoment 470 Nm. Vaiade väändemomentide erinevus oli 190 Nm ning koormus roomepiiril oli 150 mm labaga vaial 15% suurem. Vaiade väändemoment oli 75-kraadistel vaiadel 100 mm labaga vaial 250 Nm ning 150 mm labaga vaial 480 Nm, erinevus 230 Nm. Koormus roomepiiril 75-kraadistel vaiadel jäi samaks. Joonist analüüsides võib järeldada, et vaia väändemomendi suurenedes ei pruugi suureneda vaia kandevõime, kuid vaia laba suurenedes kasvab väändemoment.

### 3.9. Katsete maapinna tõusu analüüs

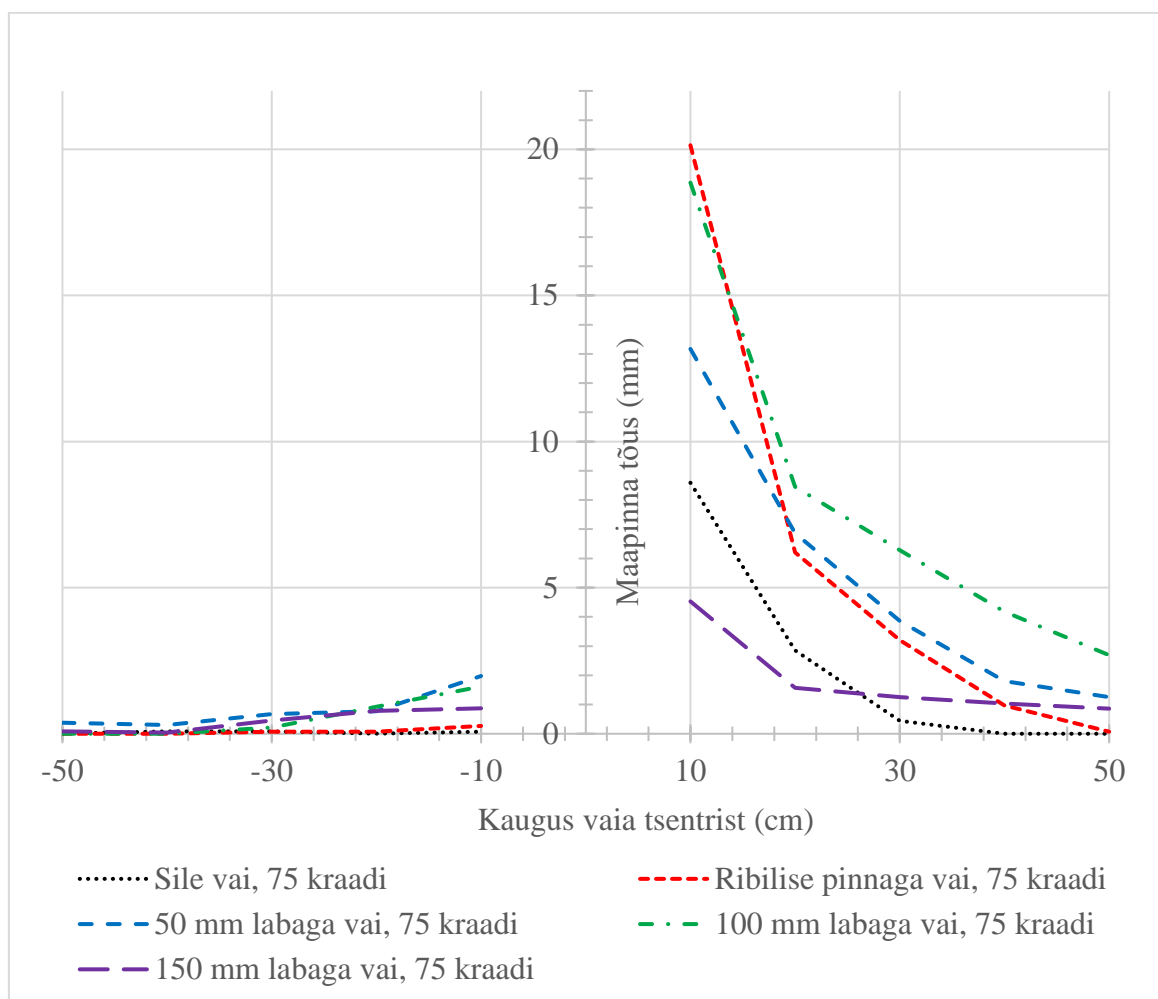
Nurga all olevate üksikvaiade ja nurga all olevate paarisvaiade tõmbekatsetega paralleelselt uuriti ka maapinna tõusu. Alloleval joonisel 3.18. on kujutatud 60-kraadiste üksikvaiade tõmbekatsete maapinna tõusu piirkoormusel.



**Joonis 3.18.** 60-kraadiste üksikvaiade tõmbekatsete maapinna tõus piirkoormusel

Maapinna tõus on kõige suurem 100 mm labaga kruvivaia puhul, seejärel tuleb sile vai ning kõige väiksem maapinna tõus on 50 mm labaga vaia puhul. Jooniselt on näha, et 60-kraadistel vaiadel tõuseb maapind ainult ühel küljel. Siit võib järeldada, et 60-kraadistel üksikvaiadel tõuseb maapind sellel küljel, kuhu poole on vaia alumine ots suunatud ning vastasküljel on maapinna tõus praktiliselt olematu.

Järgmisel joonisel 3.19. on kujutatud 75-kraadiste üksikvaiade tõmbekatsete maapinna tõusu.

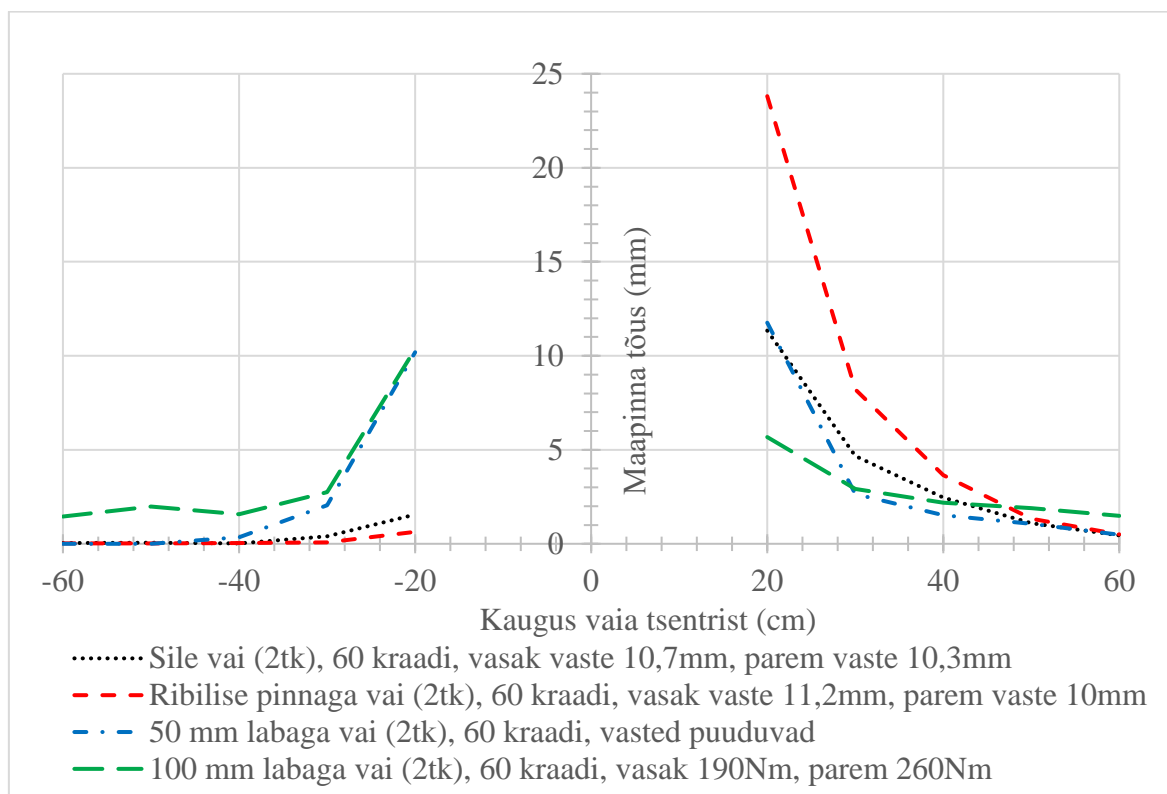


**Joonis 3.19.** 75-kraadiste üksikvaiade tõmbekatsete maapinna tõus

Joonisel on näha, et maapinna tõus on kõige suurem 100 mm labaga kruvivaia puhul, seejärel ribilise pinnaga vai, 50 mm labaga vai, sile vai ning 150 mm labaga vai. Hinnates vaia teise külje maapinna siirdeid on näha, et maapind tõusis ainult labadega vaiade puhul. Siit järeldati, et maapind tõuseb labadega vaiade puhul mõlemalt poolt, seega on tõmbekatsel töötav pinnas labadega vaiade puhul suurem. Maapind tõuseb rohkem sellel küljel, kuhu poole on suunatud vaia alumine ots.



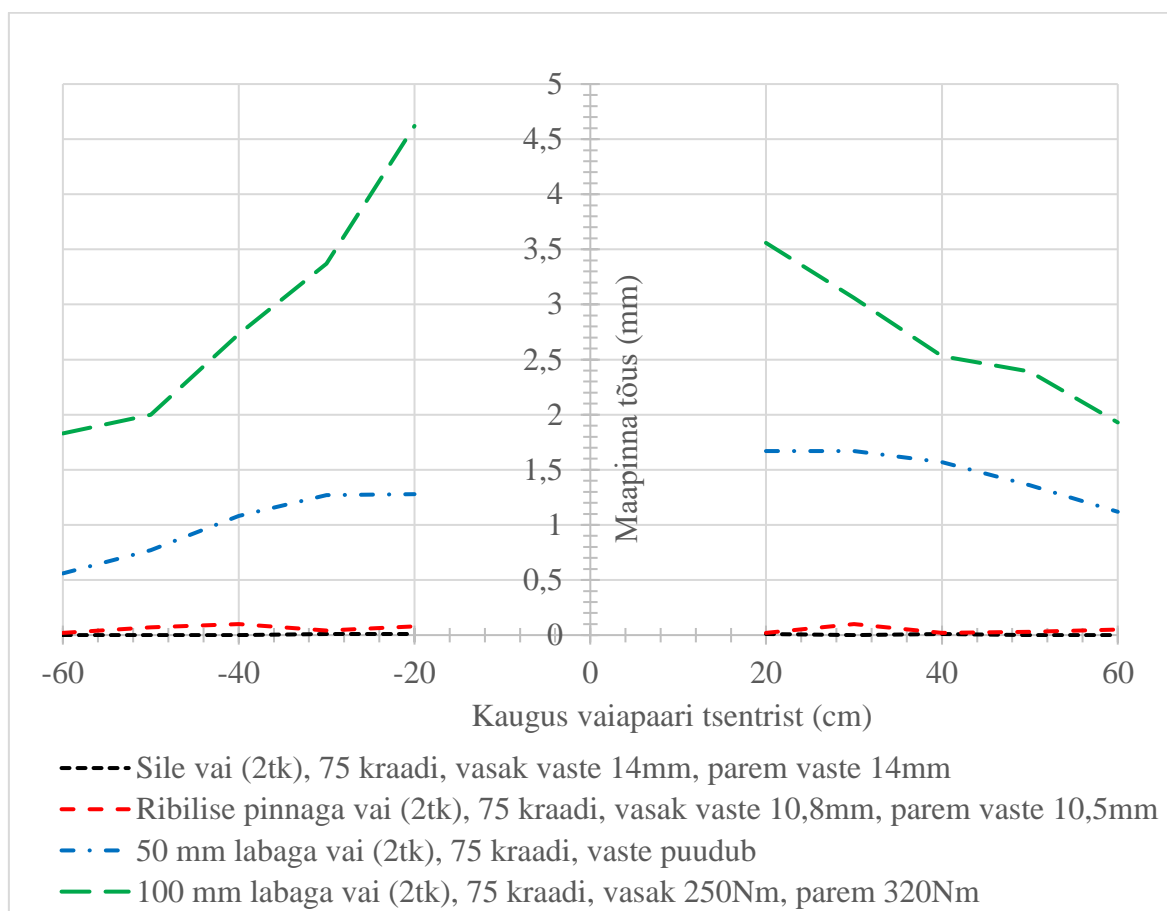
60-kraadiste paarisvaiade tõmbekatsete maapinna tõusu on kujutatud joonisel 3.20.



**Joonis 3.20.** 60-kraadiste paarisvaiade tõmbekatsete maapinna tõus

60-kraadiste paarisvaiade tõmbekatsete maapinna tõusu joonist analüüsid on näha, et vaiapaaride maapinna tõus ei ole sümmeetriline vaiapaari keskkoha suhtes. Ribilise pinnaga vaiapaar, sile vaiapaar ning 50 mm labaga vaiapaar on maapinda paremalt küljelt rohkem tõstnud. 100 mm labaga vai on maapinda vasakult küljelt rohkem tõstnud. Sileda vaiapaari vasakpoolse vaia vaste oli 4% suurem kui parempoolse vaia vaste. Vaia vaste on 10 kg kaaluva vasara kolmekordsel kukkumisel 60 cm kõrguselt mõõdetud vaia siire. Mida suurem on vaste, seda väiksem oli pinnase vastupanu. Parempoolse vaia pinnase vastupanu oli 4% võrra suurem kui vasakpoolse vaia pinnase vastupanu. Ribilise pinnaga vaiapaari puhul oli parempoolse vaia pinnase vastupanu 10% suurem kui vasakpoolse vaia. 100 mm labaga vaiapaari vasakpoolse vaia väändemoment oli 190 Nm ning parempoolse vaia väändemoment 260 Nm. Kui analüüsida pinnase vastupanu, on jooniselt selgelt näha, et labadeta vaiapaarid on piirkoormuse saavutades liikunud suuremat pinnase vastupanu kogenud vaia poole – parempoolne pinnas on rohkem tõusnud. Labadega 100 mm vaiapaar tõstis pinnast vasakult poolt rohkem, kuigi parempoolse vaia väändemoment oli suurem. Siit saab järeldada, et suurem vaia väändemoment ei tähenda alati suuremat kandevõimet.

Alljärgneval joonisel 3.21 on kirjeldatud 75-kraadiste paarisvaiade tõmbekatsete maapinna tõusu.



**Joonis 3.21.** 75-kraadiste paarisvaiade tõmbekatsete maapinna tõus

75-kraadiste paarisvaiade tõmbekatsete maapinna tõusu joonisel on näha, et 50 mm labaga vaiapaari ja 100 mm labaga vaiapaari maapinna tõus ei ole keskkoha suhtes sümmeetriline. Sileda vaiapaari ja ribilise pinnaga vaiapaari kandevõime kadus ning maapinna tõusu ei toimunud. Jooniselt on näha, et 100 mm labaga vaiapaari puhul on maapind tõusnud rohkem vasakult küljelt – see tähendab, et vaiapaar on piirkoormuse kadudes nihkunud vasakule. 100 mm labadega vaiapaari vasaku vaia väändemoment oli 250 Nm ning parema vaia väändemoment 320 Nm, kuid vaatamata parempoolse vaia suuremale väändemomendile on vaiapaar piirkoormuse kadudes nihkunud vasakule. Vaia kandevõime ja väändevõtme vahelise seose uurimiseks on antud töös katseandmeid liiga vähe.

### 3.10. Järeldused

Analüüsides 60-kraadiste ja 75-kraadiste üksikvaiade piirkandevõimet selgus, et labadeta vaiad andsid 60-kraadise nurga all suuremaid piirkoormusi ja pikemaid siirdeid kui 75-kraadise nurga all olevad labadeta vaiad. Arvatavasti on see tingitud sellest, et 60 kraadi all vaia maa seest välja tõmmates hakkab vai ennast tõmbemehhanismi suhtes sirgemaks tõmbama ning seega hakkab vastu töötama küljelt suruv pinnas. Vaia ülemine osa sisuliselt lõikab pinnast külgsuunas, kuni vaia ja tõmbemehhanismi vaheline nurk väheneb ning seejärel hakkab vai tööle tõmbetugevusele. Labadega üksikvaiade puhul olid vastupidavamad 75-kraadise nurga all olevad vaiad, tagades väiksema siirde ning suurema piirkoormuse. Vaiade labade suurenedes kasvas piirkandevõime, kuid 100 mm ja 150 mm labaga vaiade piirkandevõimed jäid suhteliselt samale tasemele. Kokkuvõtvalt võib öelda, et, 60-kraadiste labadeta vaiade katsete piirkoormused olid küll suuremad, kuid vaiade suurte siirete tõttu külgsuunas ei saa neid käsitleda praktikas tõsiseltvõetavate lahendustena. 75-kraadised üksikvaiad olid stabiilsemad ning talusid suuremat koormust.

Paralleelselt käesoleva magistritööga teostati teise magistritöö raames katseid samade katsekehadega, milles uuriti vaiade vertikaalset tõmbekandevõimet. Nimetatud uurimistöö autor on Kuido Kangur ning töö pealkiri „Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring“. Töö autori vertikaalsete tõmbekatsete tulemusi võrreldi käesolevas magistritöös nurga all olevate vaiade tõmbekatsete tulemustega. Tulemustest selgus, et 75-kraadise nurga all olevate vaiade roome- ja piirkandevõime oli 20...40% suurem kui vertikaalsetel vaiadel. 75-kraadiste vaiade siirded olid 15...25% pikemad kui vertikaalsetel vaiadel. Võrreldes vertikaalseid ja 75-kraadiseid vaiu ühe kindla siirdepikkuse juures oli selgelt näha, et kõik 75-kraadised vaiad talusid suuremat koormust. Vaiu nurga all maa seest välja tõmmates tekib vaiale paindemoment, mis suurendab omakorda vaia ja pinnase vahelist hõõrdekontakti. Kokkuvõtvalt võib väita, et 75-kraadise nurga all olevad vaiad talusid suuremat koormust ning olid stabiilsemad kui vertikaalsed või 60-kraadise nurga all olevad vaiad.

Kahe erineva nurga all olevate vaiapaaride analüüsist selgus, et 75-kraadise nurga all olevad vaiapaarid talusid 15...25% suuremat piirkoormust. Vaiapaaride siirded 75-kraadiste vaiapaaride puhul olid 5...40% väiksemad. 75-kraadiste vaiapaaride roomepiir oli oluliselt suurem kui 60-kraadistel vaiapaaridel. Kokkuvõtvalt olid 75-kraadise nurga all olevad

vaiapaarid suurema kandevõimega, väiksema siirdega ning kõrgema roomepiiriga. Lisaks vaiades tekkivale paindemomendile on 75-kraadiste vaiade suurema kandevõime põhjuseks arvatavasti ka vaia otste sügavamal paiknemine, mistõttu on pinnase surve suurem.

Analüüsides nurga all olevat üksikvaia ja vaiapaari selgus, et vaiapaari kandevõime oli ~30% suurem kui üksikvaia kandevõime. Vaiapaaride siirded olid väiksemad ning roomepiirid suuremad võrreldes üksikvaiadega. Vaadeldes materjali ökonoomsuse poolelt, olid vaiapaarid koormates küll stabiilsemad, kuid me ei tea, kuidas käituksid koormates kaks eraldi nurga all olevat ja kõrvuti asetsevat üksikvaia.

Vertikaalsete vaiade vahekauguse mõju uurides selgus, et 800 mm vahekaugusega vaiad talusid ~20% suuremat koormust kui 400 mm vahekaugusega vaiad. Arvatavasti 400 mm vahekaugusega tõmbekatsete puhul ühilduvad vaiadele vastu töötava pinnase hulgad. 100 mm labaga kruvivaiade puhul mõõdeti ka väändevõtmega pinnase vastupanu. Katsete käigus kaotas üks vai (väändevõtme näit oli teise vaiaga võrreldes väiksem) alati varem kandevõime ning seetõttu oli vaia siire suurem kui teisel. Vahekauguse suurenedes 400-lt 800 mm-le kasvasid vaiade siirete vahelised erinevused.

Üksikvaiade maapinna tõusu analüüsides selgus, et 60-kraadiste vaiade puhul tõusis pinnas ainult ühel küljelt. Järelikult on 60-kraadine nurk maapinna suhtes liiga väike, töötab ainult ühel küljel asuv pinnas. 75-kraadiste labadega üksikvaiadel tõusis pinnas mõlemal küljel ning labadeta vaiadel ühel küljel. Analüüsides nurga all olevate paarisvaiade maapinna tõusu piirkoormusel selgub, et pinnase tõus oli keskkoha suhtes ebasümmeetriline. Arvatavasti on see tingitud sellest, et üks vai kaotab kandevõime varem ning seetõttu nihkub vaiapaar piirkoormuse saavutades tugevama kandevõimega vaia poole. 75-kraadistel labadeta paarisvaiadel pinnasetõusu ei esinenud. Kokkuvõtvalt võib väita, et mida suurem on vaia laba, seda laiaulatuslikum on maapinna tõus.

Käesoleva magistritöö üks eesmärkidest oli leida kergete/ajutiste PVC hallidele optimaalsemaid vundamendi lahendusi. AS Maru inseneride poolt arvatatud 15 m laiuse raami tuule tõstev arvutuslik reaktsioon on 15 kN. Tuginedes antud uurimuses saadud tulemustele, sobib liivpinnases vundamendi lahenduseks näiteks 75-kraadise nurga all olevad 100 mm labaga kruvivaiad (sammuga 1,25m). Raamides mõjuvad ka horisontaalsed reaktsioonid, kuid antud töös neid ei käsitleta.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti lühikeste terasest kruvivaiade käitumist ning kandevõimet vertikaal- ja horisontaalkoormusel. Vertikaal- ja horisontaalkoormus rakendus katsekehadele nende nurga all välja tõmbamisel. Antud töö koosneb varasemate sarnaste uuringutega tutvumisest, katsemudeli välja töötamisest, laboratoorsetest katsete sooritamisest, tulemuste võrdlusest ja analüüsist. Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli labori pinnasekastis.

Magistritöö põhieesmärgiks oli uurida maa sisse nurga all süvistatud vaia mõju tõmbekandevõimele. Paralleelselt käesoleva magistritööga teostati teise magistritöö raames katseid samade katsekehadega, milles uuriti vaiade vertikaalset tõmbekandevõimet. Nimetatud uurimistöö autor on Kuido Kangur ning töö pealkiri „Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring“. Töö autori tehtud katsete tulemusi võrreldi käesolevas magistritöös nurga all olevate vaiade tõmbekatsete tulemustega. Tulemustest selgus, et 75-kraadise nurga all maapinna suhtes tagasid vaiad 20...50% suurema piirkandevõime olenevalt vaiatüübist. Kasutades vundamentides nurga all süvistatud kruvivaiu, on võimalik tagada 20...50% väiksem materjali kulu. 60-kraadise nurga all olevate vaiade tõmbekandevõime jäi vertikaalsete vaiade piirkandevõimele alla.

Teiseks töö eesmärgiks oli välja selgitada nurga all oleva kahe vaia mõju tõmbekandevõimele. Tulemustest selgus, et kahe vaia kasutamine tagab küll üksikvaiast suurema kandevõime, kuid seda ainult 15...40% olenevalt vaiatüübist. Vaiapaari vähese efekti tõttu on praktikas ilmselt odavam kasutada üksikvaiu. 75-kraadiste ja 60-kraadiste vaiapaaride võrdluses kordus sama muster mis üksikvaiade puhul: 75-kraadise vaiapaari tõmbekandevõime oli suurem.

Töö viimaseks eesmärgiks oli uurida kahe vertikaalse vaia vahekauguse mõju tõmbekandevõimele. Laboris sooritatud katsete tulemustest selgus, et 800 mm vahekaugus tagas suurema tõmbekandevõime kui 400 mm vahekaugus. Suurema labaga vaia puhul talus vaiapaar vahekauguse suurenedes suuremat koormust. See on tingitud sellest, et tõmbekatsel

kaasavad erinevad laba diameetrid pinnast erinevas mahus. Iga vaia laba diameetri põhjustatud pinnase deformatsioon on erineva suuruse ja ulatusega, seega on igale kruvivaiale (kindla laba diameetriga) olemas optimaalne vahekaugus, mille puhul vaiade üldine piirkandevõime on kõige suurem. Optimaalse vahekauguse välja selgitamiseks on vajalikud edaspidised uurimised.

Kruvivaiade kasutamine nurga all tagab küll suurema tõmbekandevõime, kuid pole teada, kuidas selline vaia asetus mõjutab survekandevõimet. Käesolev magistr töö uuris 75-kraadise ja 60-kraadise nurga all olevaid kruvivaiu, kus 75-kraadised vaiad talusid suuremat koormust. Edasi oleks vaja uurida asfaldi mõju tõmbekandevõimele. Samuti on vaja uurida, milline lahendus oleks optimaalne horisontaalse koormuse vastu võtmiseks.

## SUMMARY

The aim of this thesis is to study the behavior and load bearing under vertical and horizontal load. Both vertical and horizontal load were applied through adding vertical force after subject had been driven into the soil diagonally. The thesis consists of literature review on the same topic, working out a test program, performing tests, comparing and analyzing results. All tests were performed in Estonian University of Life Science's structural laboratory.

The main reason for this master's thesis were to study the load bearing of inclined helical pile under tension. Simultaneously another masters thesis were carried out by Kuido Kangur, who investigated load bearing under vertical load in his thesis "Investigation of behavior and bearing capacity of short helical piles". The results of Kuido's work were compared to the results in this thesis. Comparison showed that piles under 75 degrees of angle performed 20-50% better than straight 90 degree piles under tension. The usage of helical piles proves to reduce the required materials for a foundation by 20-50%. Maximum load capacity for 60 degree piles were worse than vertical pile's.

The second purpose of the thesis was to figure out the load bearing capacity of a pile group, that consisted of two piles, both driven into the soil diagonally. Test results illustrated that using a two pile group does increase bearing capacity, but only about 15-40% depending on the pile. Due to that, it is probably better to use just one screw pile in real life conditions. Once again piles under 75 degree performed better than their 60 degree counterparts.

Finally, the effects of the distance between two vertically inserted piles were investigated. Laboratory test results showed that 800 mm spacing between subjects worked better than the spacing of 400 mm. Pair of piles with wider diameter performed better as the spacing increased. It is a result of different helix diameters affecting soil in a different capacity. Every soil deformation caused by the test subject is with different size and range, based on helix diameter, so every pair or array of piles has an optimal spacing, where the total load bearing is the highest as it can be. More tests should be carried out to find these optimal spacings.

Driving helical piles into the soil diagonally does increase tension capacity, however it is uncertain how will it affect compression capacity. This thesis studied helical piles installed under 60 and 75 degrees where piles under 75 degree had superior results. Further studies need to be made to evaluate the effect of having a layer of asphalt on top of the ground. In addition it is neccessary to find out the optimal solution for horizontal load.



## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **G.Klein, N. Doroškevitš, P. Smirenkin.** (1970). Alused ja vundamendid. Tallinn: kirjastus Valgus.
2. **Alan J Luteneegger.** (2011). Historical Developement of Iron Screw-Pile Foundations: 1836–1900. – *INT. J. FOR THE HISTORY OF ENG. & TECH.* Vol. 81, No. 1, pp. 108–28.
3. **R. Cox.** (1995). Alexander Mitchell and the Screw-Pile. – *Centre for Civil Engineering Heritage, Trinity College.* Dublin, pp.14.
4. **A. Mitchell.** (1849). On Submarine Foundations; **A. Mitchell.** (1839). Construction of Lighthouses on Sands. *CEAJ* 2, pp. 37–38; **A. Mitchell.** (1841). The Maplin Lighthouse. *CEAJ* 4, p. 132; **A. Mitchell.** (1842). The Maplin Lighthouse. *CEAJ* 5, p. 69.
5. **H. M. Denham.** (1840). Wyre Lighthouse. *CEAJ* 3, pp. 181–182.
6. **A. Mitchell.** (1849). On Submarine Foundations.
7. (1869). Sinking Screw Piles. *Scientific American.* P. 385.
8. **C. W. Anderson.** (1899). Hydraulic Pile-Screwing. *ICE* 139, pp. 302–307.
9. **F.M. Abdrabbo, A.Z. El Wakil.** (2016). Laterally loaded helical piles in sand. – *Alexandria Engineering Journal.* Vol. 55, No. 4, pp. 3239–3245.
10. **Y. Prasad, R. Narasimha.** (1996). Lateral capacity of helical piles in clays. *J. Geotech. Eng.* 122 (11), pp. 938–941.
11. **S. Narasimha, Y. Prasad.** (1993). Estimation of uplift capacity of helical pile anchors in clay. *J. Geotech. Eng., ASCE* 119 (2), pp. 352–357.
12. **S. Narasimha, Y. Prasad, M. Shetty.** (1991). The behavior of model screw piles in cohesive soils. *Soils Found.* 31 (2), pp. 35–50.
13. **Ramli Nazir, How Seng Chuan, Hamed Niroumand, Khairul Anuar Kassim.** (2014). Performance of single vertical helical anchor embedded in dry sand. *Measurement.* Vol. 49, pp. 42–51.
14. **M. P. Mitsch, S. P. Clemence.** (1985). The uplift capacity of helix anchors in sand. *Uplift Behav. Anchor Found. Soil ASCE.* Pp. 26–47.

15. **A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna.** (1991). Uplift behavior of screw anchors in sand.  
*J. Geotech. Eng. Div. ASCE.* Pp 773–793.
16. **Eesti Keskkonnauuringute Keskus.** (2015). Teimiprotokoll 04X – 15.
17. **EN 13782.** (2015). Temporary structure – Tents – Safety

## LISAD

### Lisa 1. Vaia süvistamisel kasutatud abivahendid



**Joonis 1.1.** Vaia maa sisse süvistamisel kasutatud šabloon



**Joonis 1.2.** Vaiade maa sisse keeramisel kasutatud vaiavõti

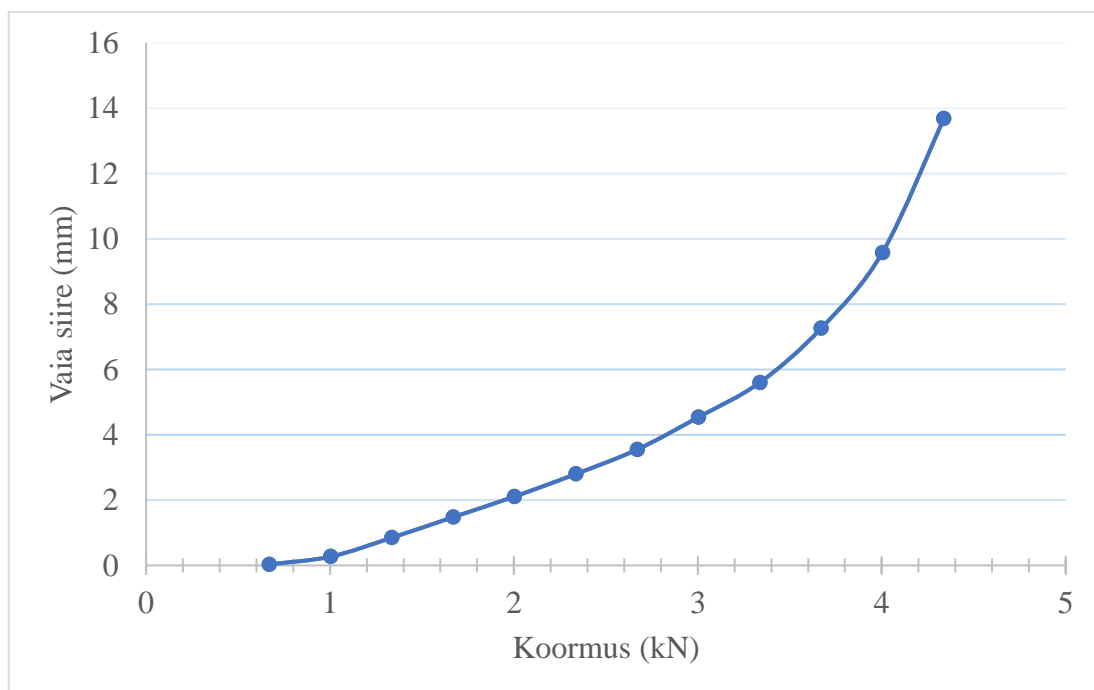
## Lisa 2. Katseprotokoll

**Tabel 2.1.** 75-kraadise sileda vaia rammimise vaste

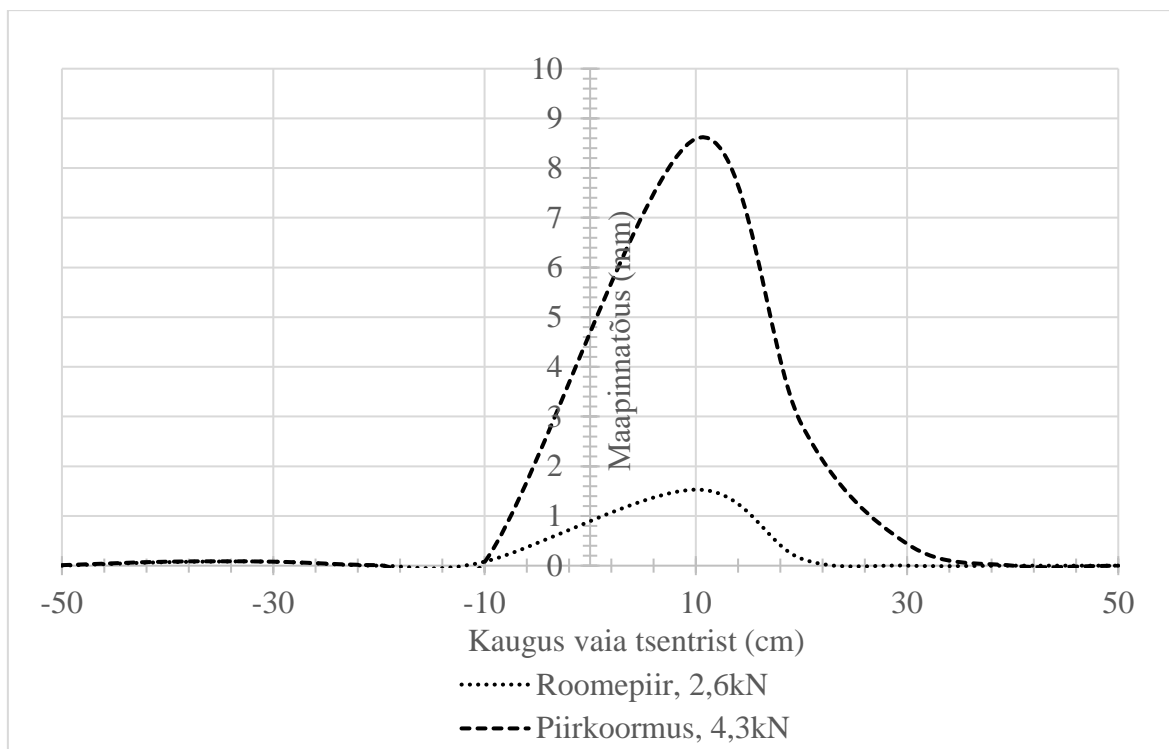
Jrk nr	Siire (mm)
1	10,5
2	10,5
3	9,5

**Tabel 2.2.** 75-kraadise sileda vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	0,67	0,03
2	1	0,27
3	1,34	0,85
4	1,67	1,48
5	2	2,11
6	2,34	2,8
7	2,67	3,55
8	3	4,54
9	3,34	5,6
10	3,67	7,26
11	4	9,58
12	4,34	13,68



**Joonis 2.1.** 75-kraadise sileda vaia tõmbekatse koormusgraafik



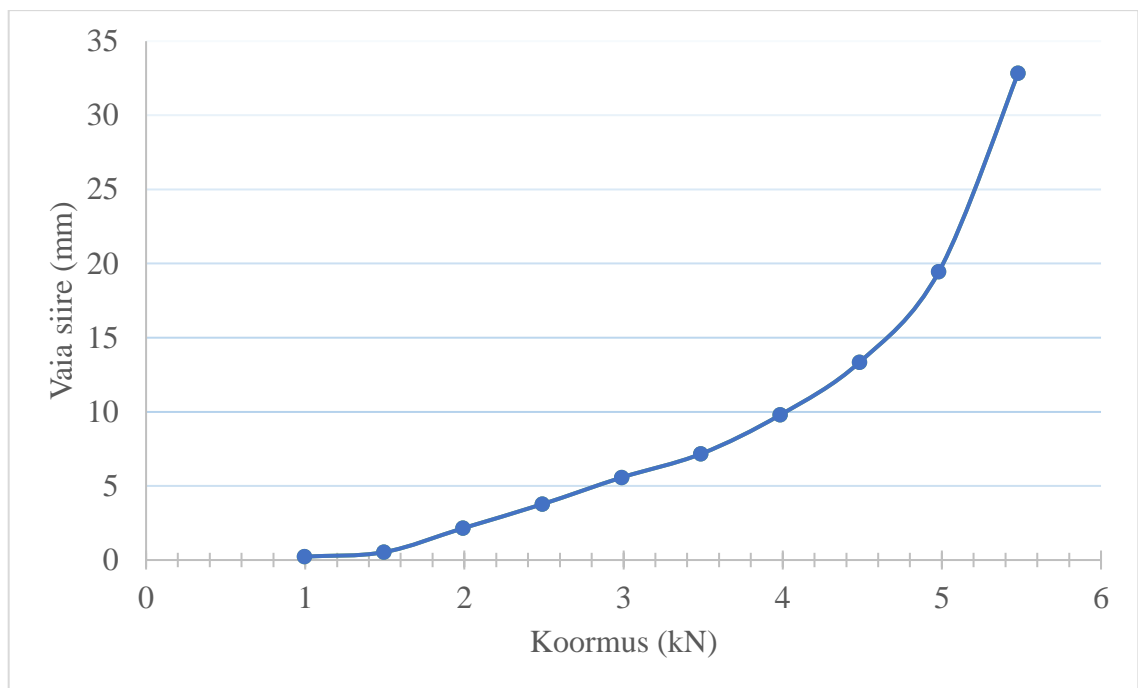
**Joonis 2.2.** 75-kraadise sileda vaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.3.** 75-kraadise ribilise pinnaga vaia rammimise vaste

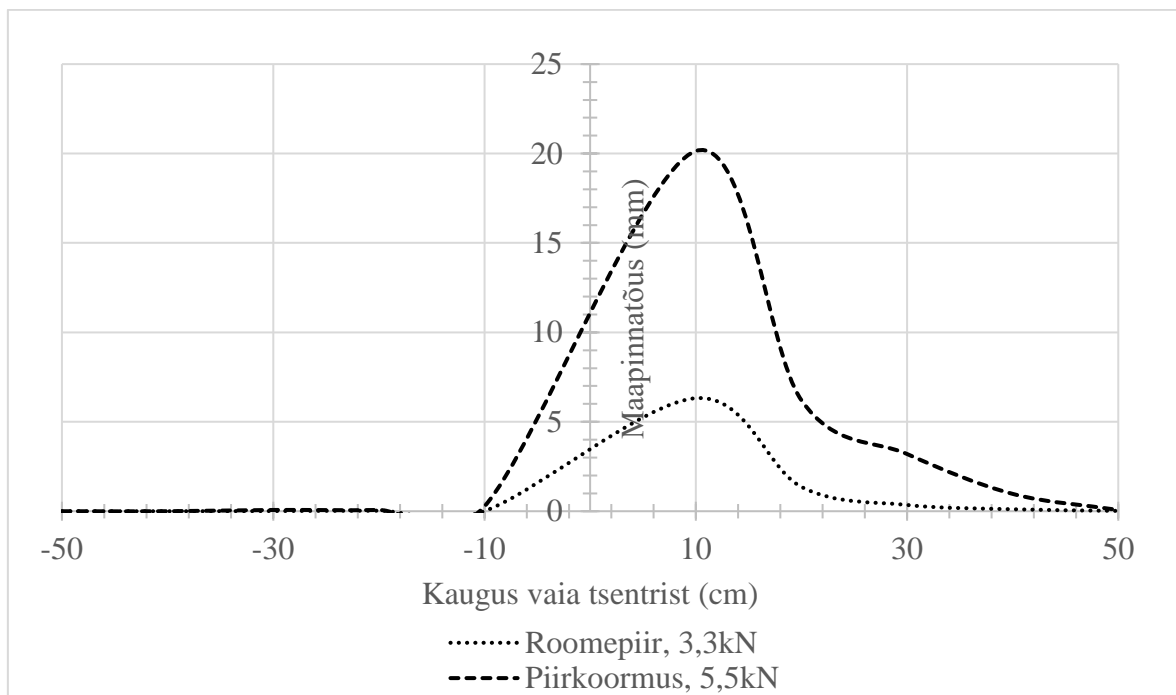
Jrk nr	Siire (mm)
1	9,3
2	9
3	8,3

**Tabel 2.4.** 75-kraadise ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	1	0,23
2	1,5	0,53
3	2	2,15
4	2,5	3,77
5	3	5,57
6	3,5	7,16
7	4	9,79
8	4,5	13,34
9	5	19,44
10	5,5	32,83



**Joonis 2.3.** 75-kraadise ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormusgraafik



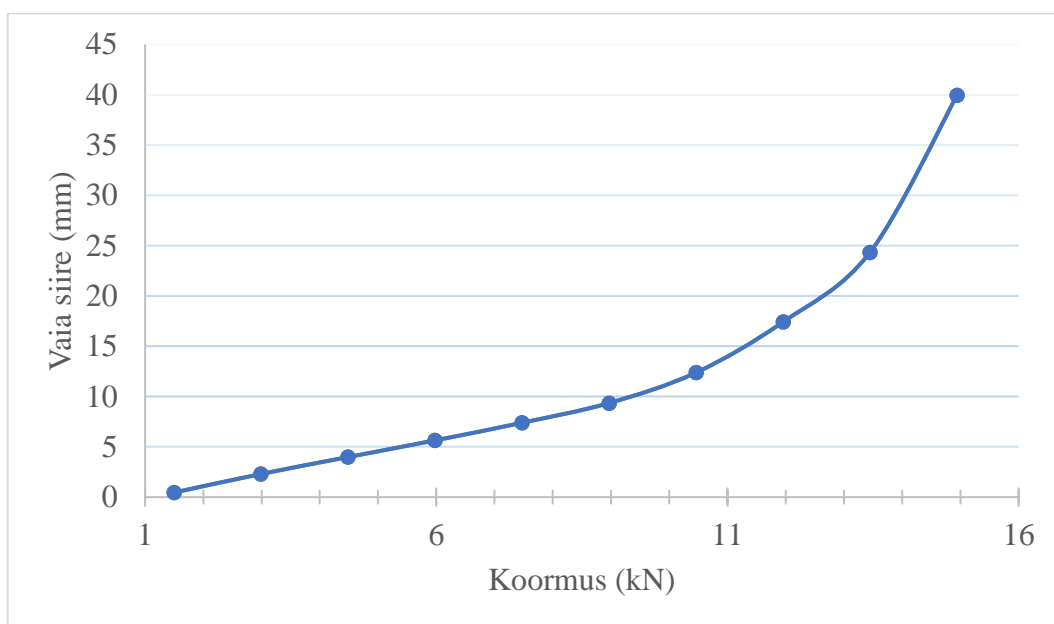
**Joonis 2.4.** 75-kraadise ribilise pinnaga vaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.5.** 75-kraadise 50mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormustabel

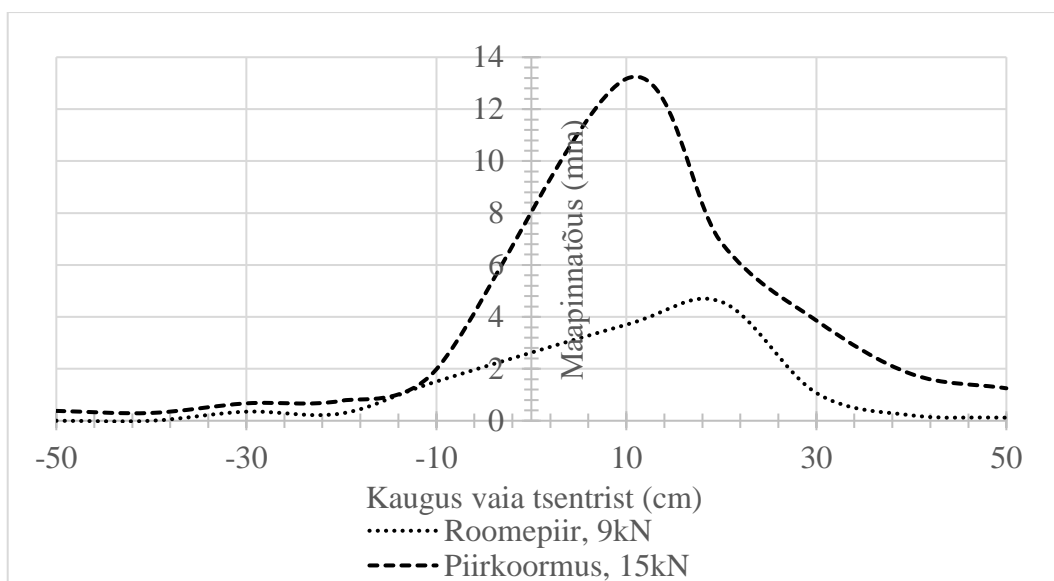
Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
A	1	2
1	1,5	0,45
2	3	2,3
3	4,5	3,98

Tabeli 2.5. järg

A	1	2
4	6	5,64
5	7,5	7,39
6	9	9,35
7	10,5	12,38
8	12	17,41
9	13,5	24,34
10	15	39,95



**Joonis 2.5.** 75-kraadise 50mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormusgraafik



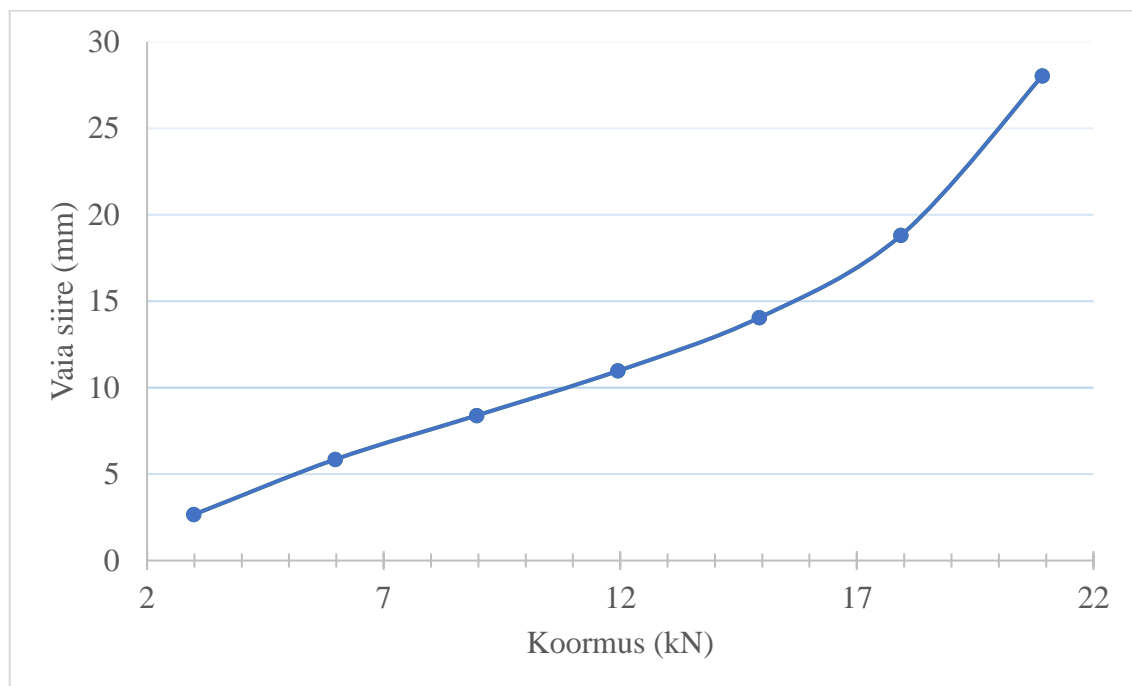
**Joonis 2.6.** 75-kraadise 50mm labaga kruvivaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.6.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia väändemoment

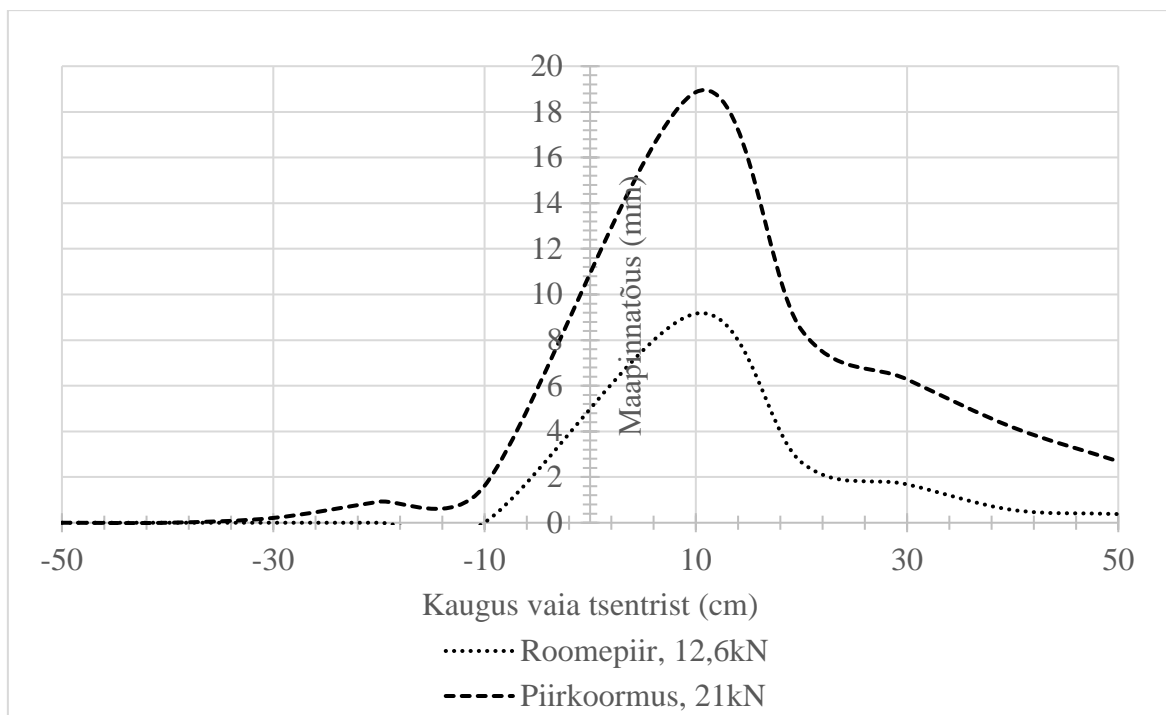
Jrk nr	Väändemoment (Nm)
1	200
2	260
3	250

**Tabel 2.7.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	3	2,66
2	6	5,85
3	9	8,39
4	12	10,97
5	15	14,05
6	18	18,8
7	21	28,03

**Joonis 2.7.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormusgraafik





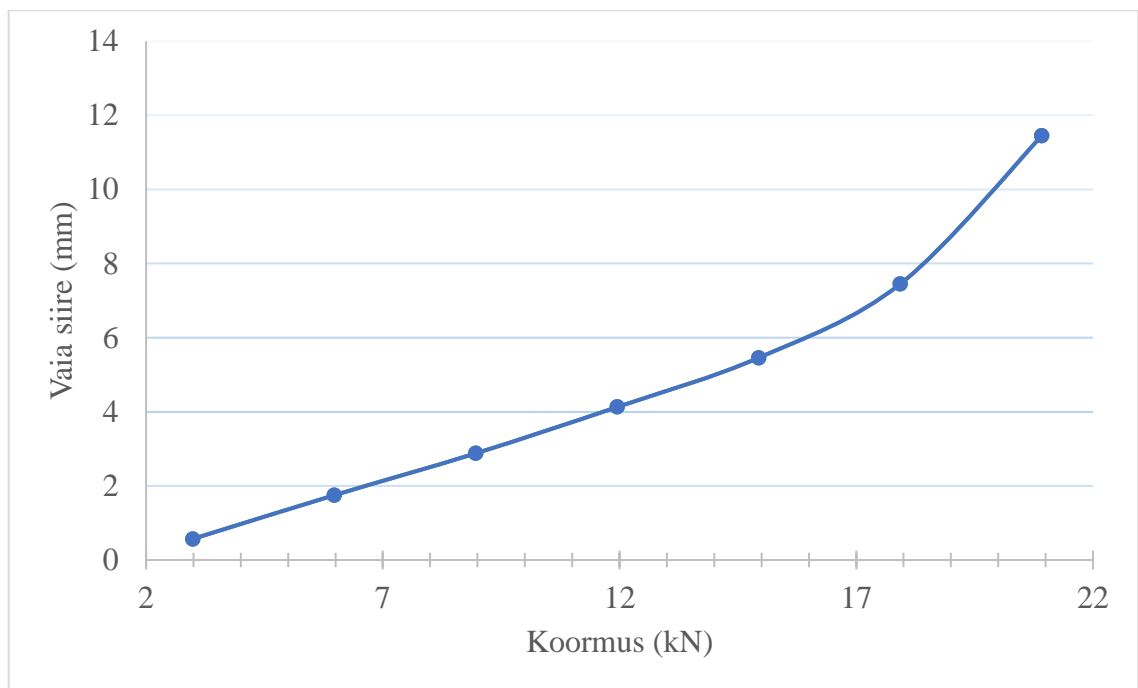
**Joonis 2.8.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.8.** 75-kraadise 150mm labaga kruvivaia väändemoment

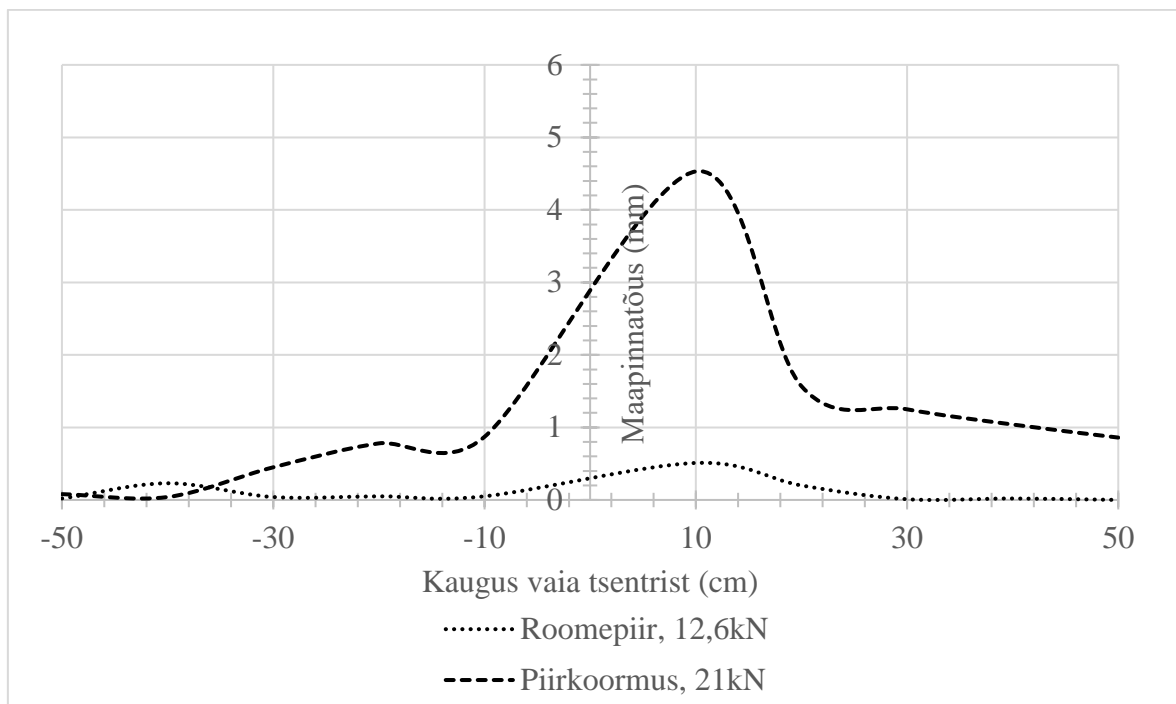
Jrk nr	Väändemoment (Nm)
1	400
2	500
3	480

**Tabel 2.9.** 75-kraadise 150mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	3	0,57
2	6	1,75
3	9	2,88
4	12	4,13
5	15	5,46
6	18	7,45
7	21	11,45



**Joonis 2.9.** 75-kraadise 150mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormusgraafik



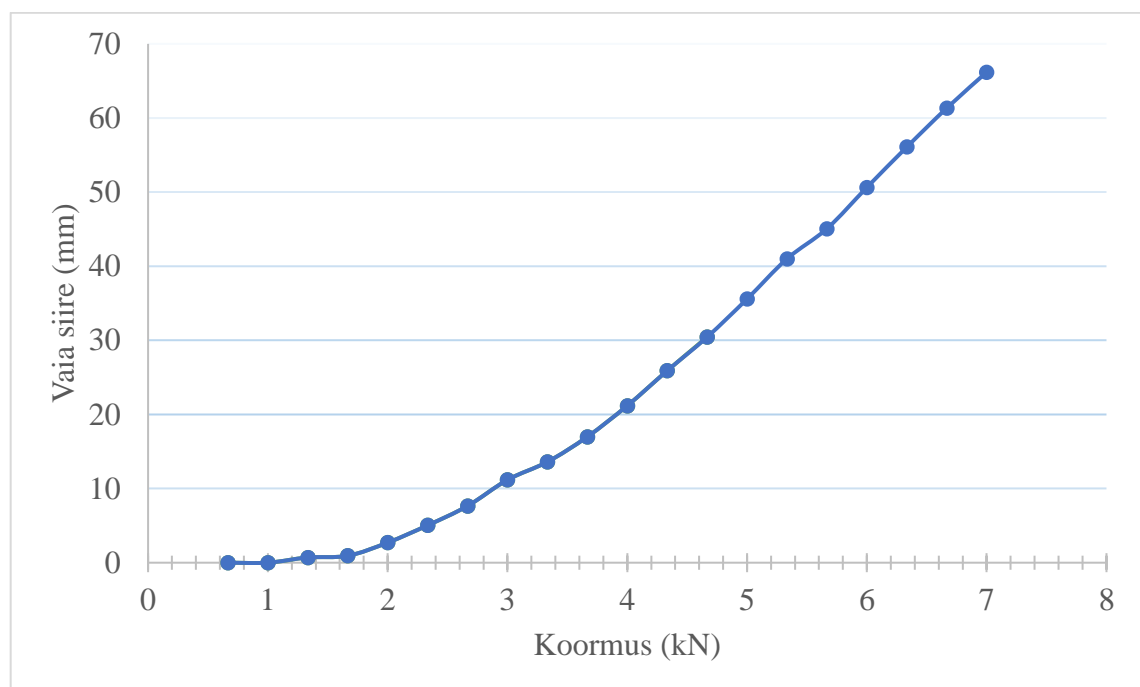
**Joonis 2.10.** 75-kraadise 150mm labaga kruvivaia tõmbekatse maapinna tõus

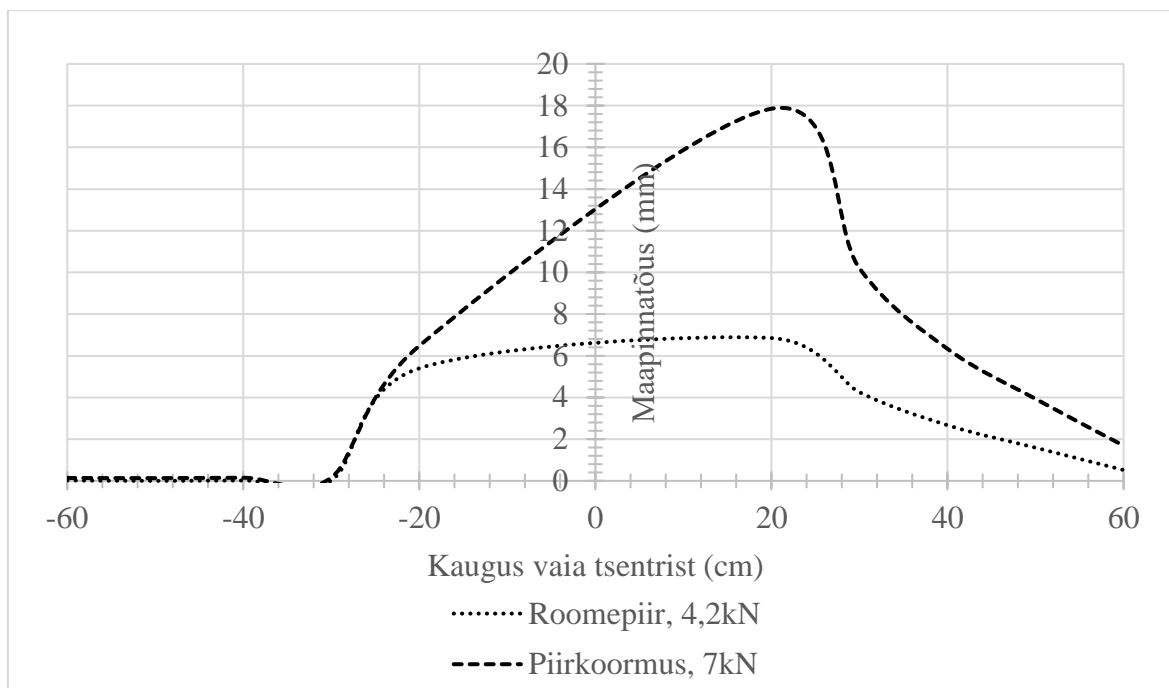
**Tabel 2.10.** 60-kraadise sileda vaia rammimise vaste

Jrk nr	Siire (mm)
1	8,5
2	9
3	7,5

**Tabel 2.11** 60-kraadise sileda vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	0,67	0
2	1	0
3	1,33	0,7
4	1,66	0,93
5	2	2,71
6	2,33	5,04
7	2,67	7,65
8	3	11,18
9	3,33	13,6
10	3,67	16,99
11	4	21,18
12	4,33	25,9
13	4,67	30,44
14	5	35,58
15	5,33	41
16	5,67	45,06
17	6	50,63
18	6,33	56,08
19	6,67	61,33
20	7	66,18

**Joonis 2.11.** 60-kraadise sileda vaia tõmbekatse koormusgraafik



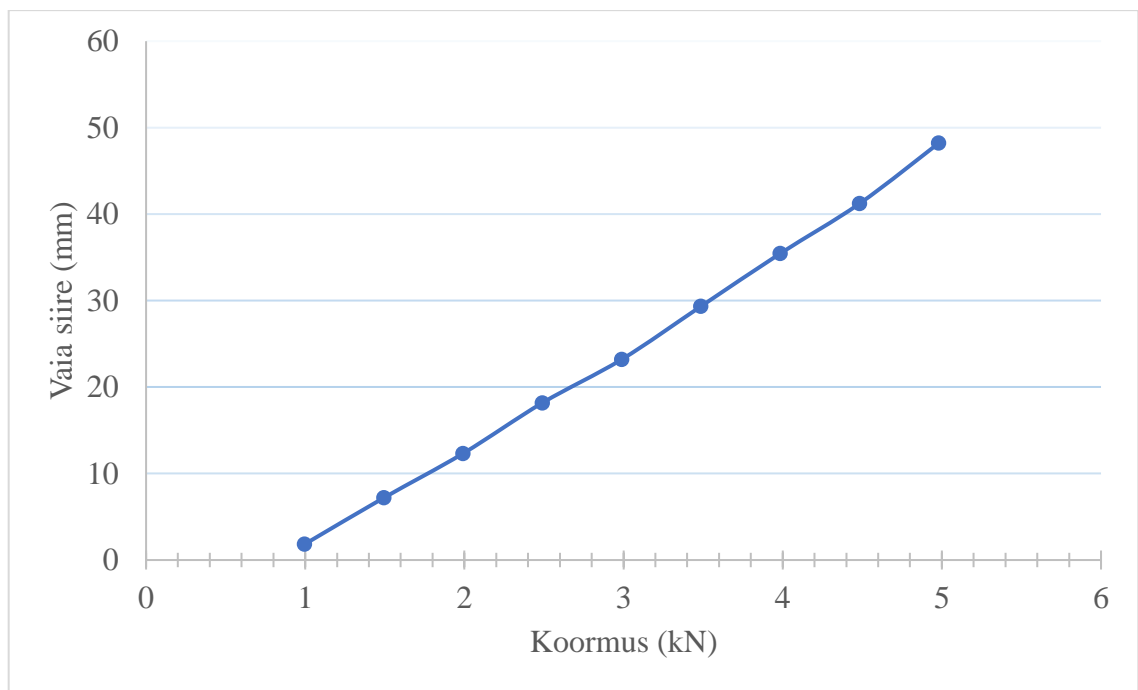
**Joonis 2.12.** 60-kraadise sileda vaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.12.** 60-kraadise ribilise pinnaga vaia rammimise vaste

Jrk nr	Siire (mm)
1	9,8
2	7
3	7,2

**Tabel 2.13.** 60-kraadise ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormustabel (ebaõnnestunud katse-ei saanud piirkoormust kätte)

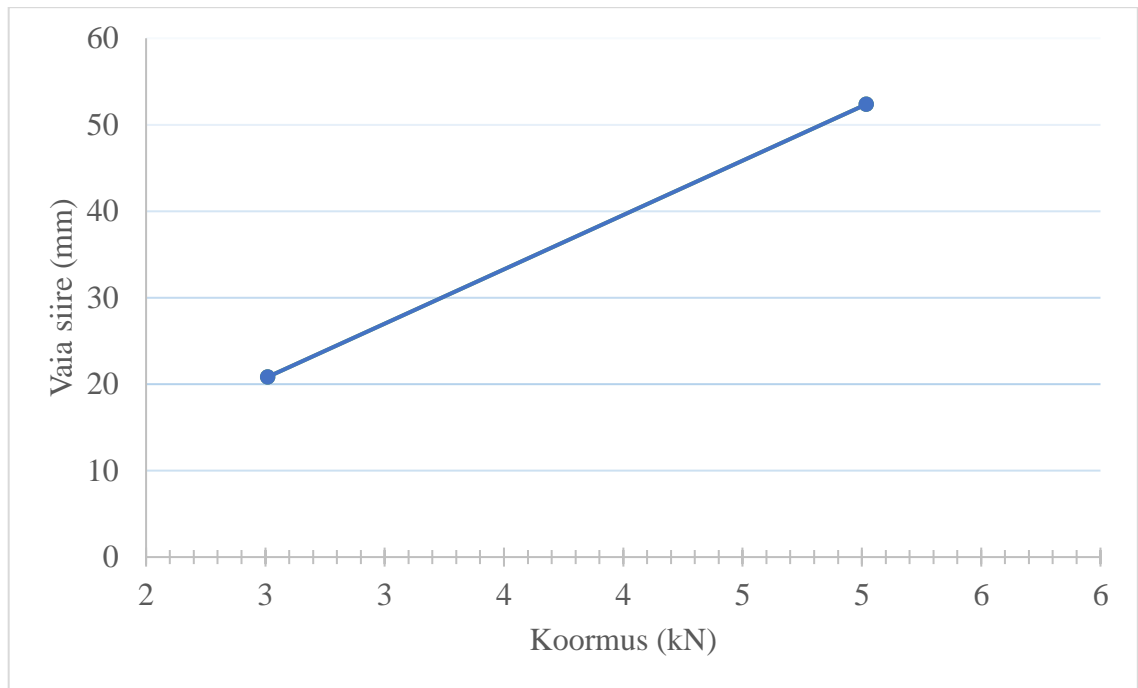
Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	1	1,83
2	1,5	7,2
3	2	12,33
4	2,5	18,18
5	3	23,2
6	3,5	29,34
7	4	35,45
8	4,5	41,22
9	5	48,22



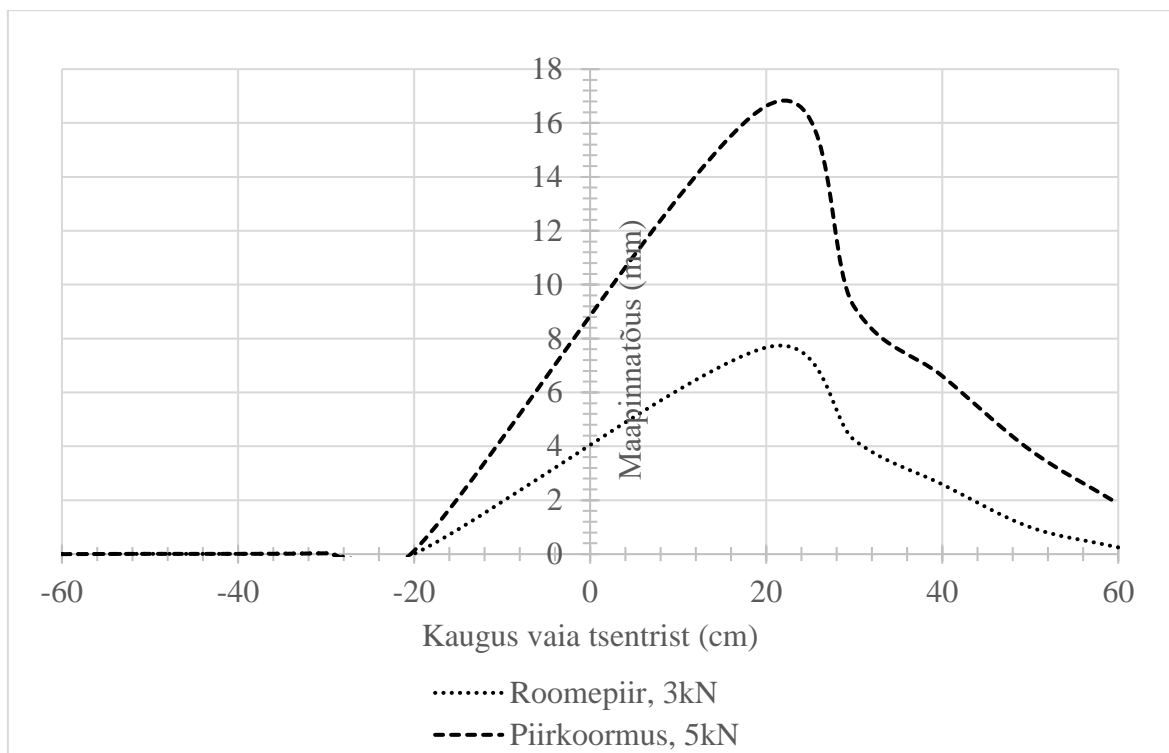
**Joonis 2.13.** 60-kraadise ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormusgraafik (ebaõnnestunud katse-ei saanud piirkoormust kätte)

**Tabel 2.14.** 60-kraadise 50mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	2,5	20,83
2	5	52,37



**Joonis 2.14.** 60-kraadise 50mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormusgraafik



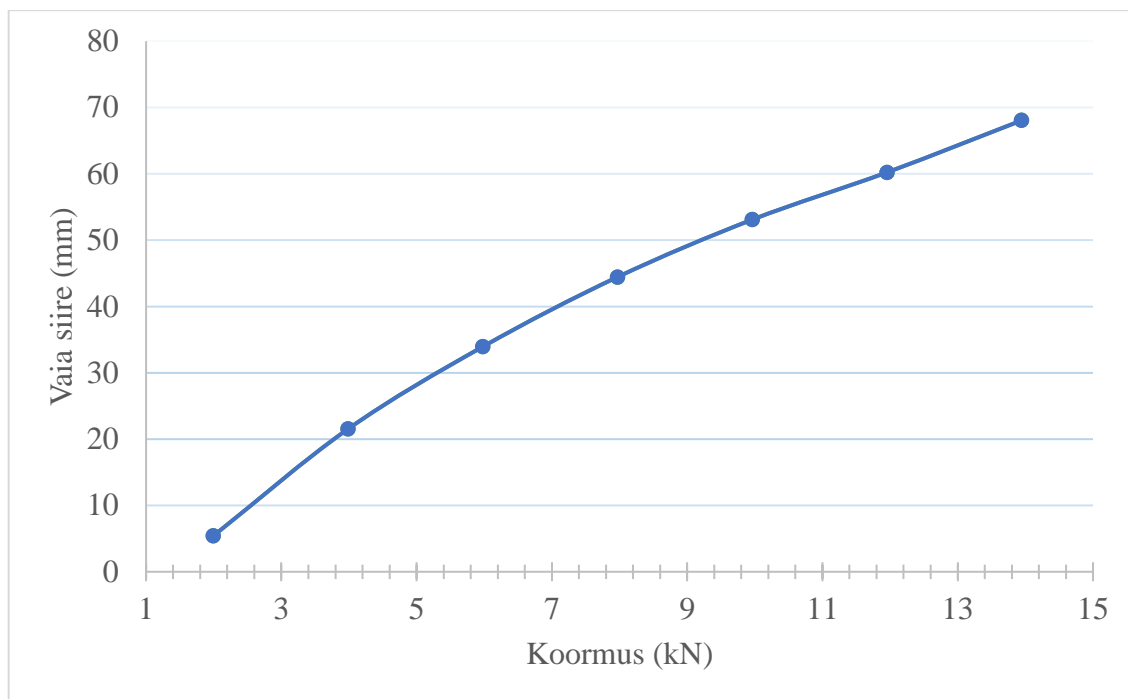
**Joonis 2.15.** 60-kraadise 50mm labaga kruvivaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.15.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia väändemoment

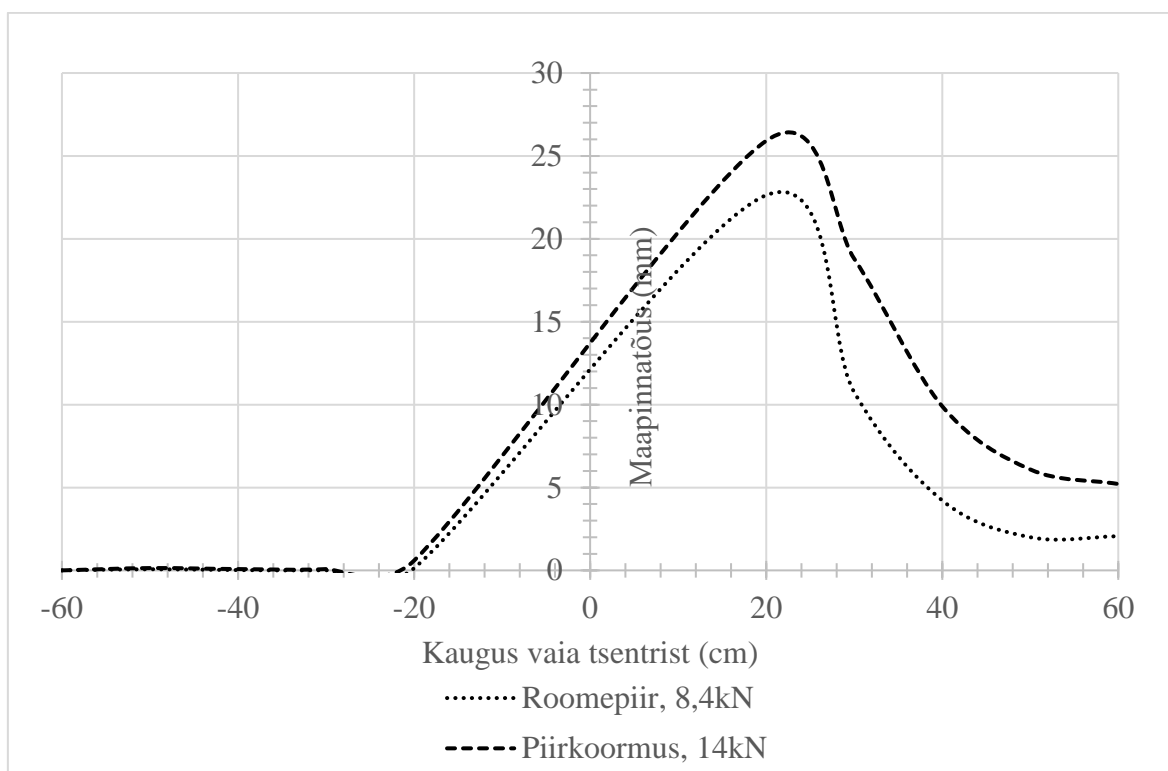
Jrk nr	Väändemoment (Nm)
1	250
2	270
3	290

**Tabel 2.16.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	2	5,4
2	4	21,52
3	6	33,93
4	8	44,44
5	10	53,09
6	12	60,22
7	14	68,06



**Joonis 2.16.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormusgraafik



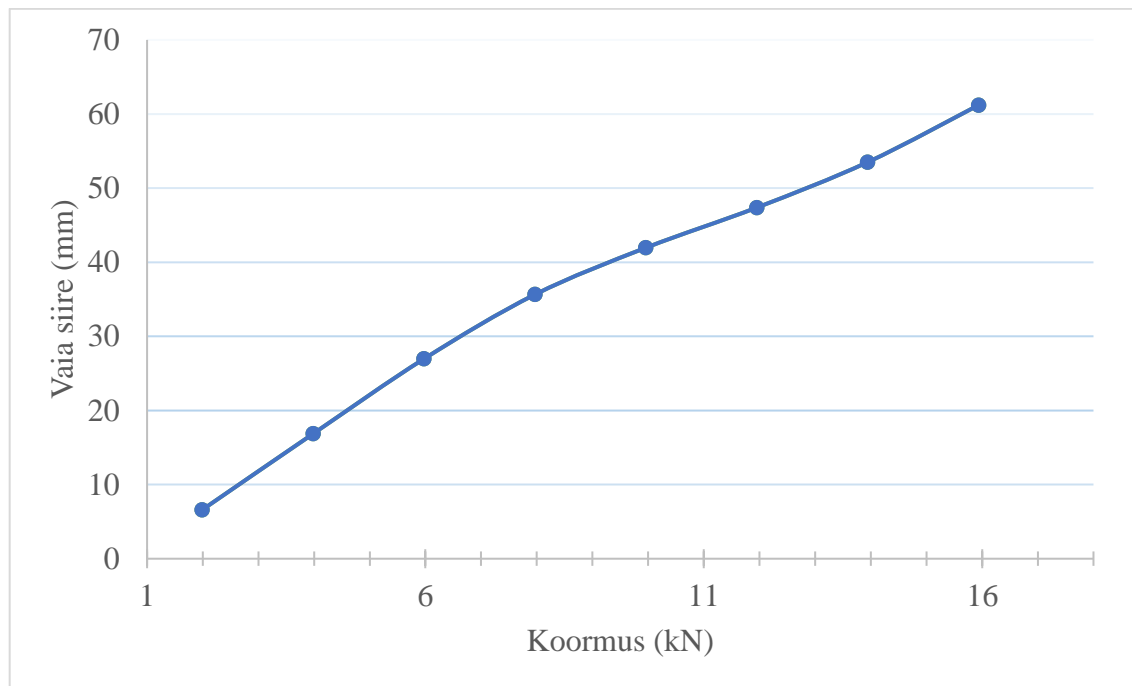
**Joonis 2.17.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.17.** 60-kraadise 150mm labaga kruvivaia väändemoment

Jrk nr	Väändemoment (Nm)
1	400
2	450
3	470

**Tabel 2.18.** 60-kraadise 150mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	2	6,61
2	4	16,87
3	6	26,98
4	8	35,65
5	10	41,96
6	12	47,38
7	14	53,51
8	16	61,21

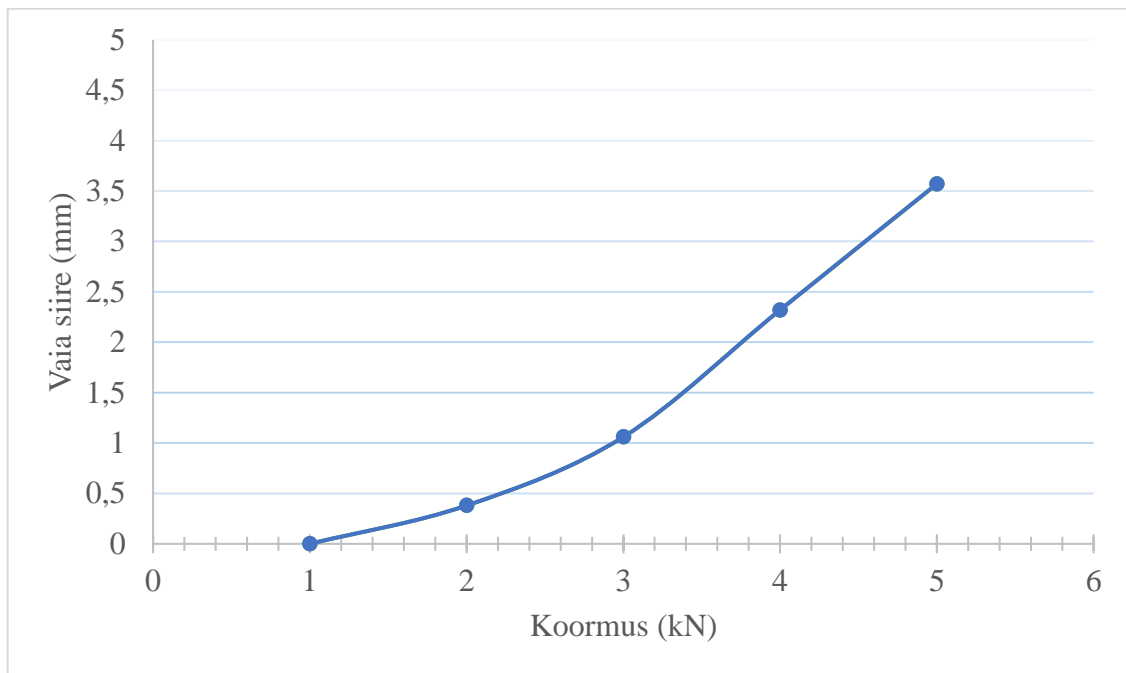
**Joonis 2.18.** 60-kraadise 150mm labaga kruvivaia tõmbekatse koormusgraafik**Tabel 2.19.** 75-kraadise kahe sileda vaia rammimise vaste

Jrk nr	Siire (mm)	
	vai nr 1	vai nr 2
1	16	14
2	13	14
3	13	13,9

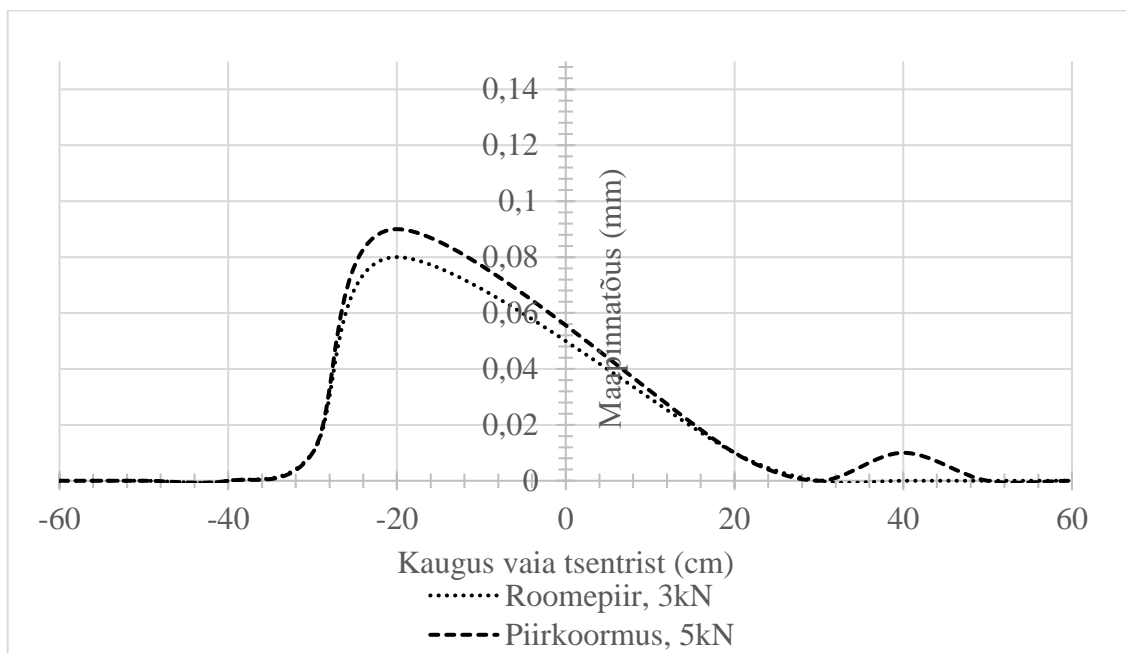


**Tabel 2.20.** 75-kraadise kahe sileda vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	1	0
2	2	0,38
3	3	1,06
4	4	2,32
5	5	3,57



**Joonis 2.19.** 75-kraadise kahe sileda vaia tõmbekatse koormusgraafik



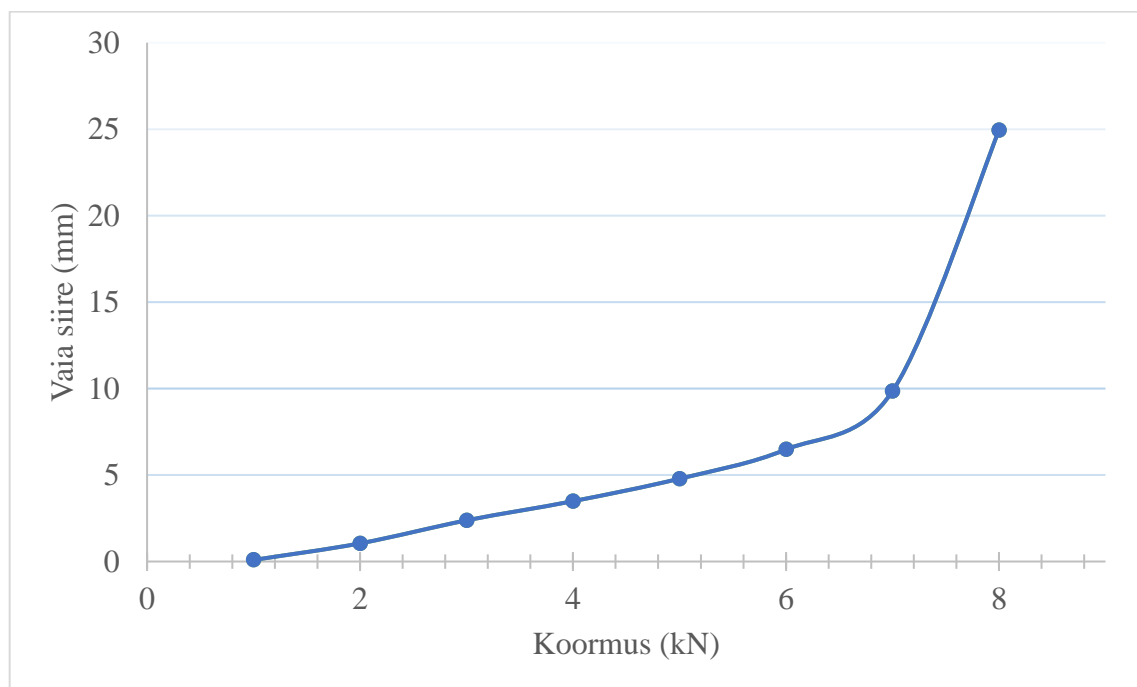
**Joonis 2.20.** 75-kraadise kahe sileda vaia tõmbekatse maapinna tõus

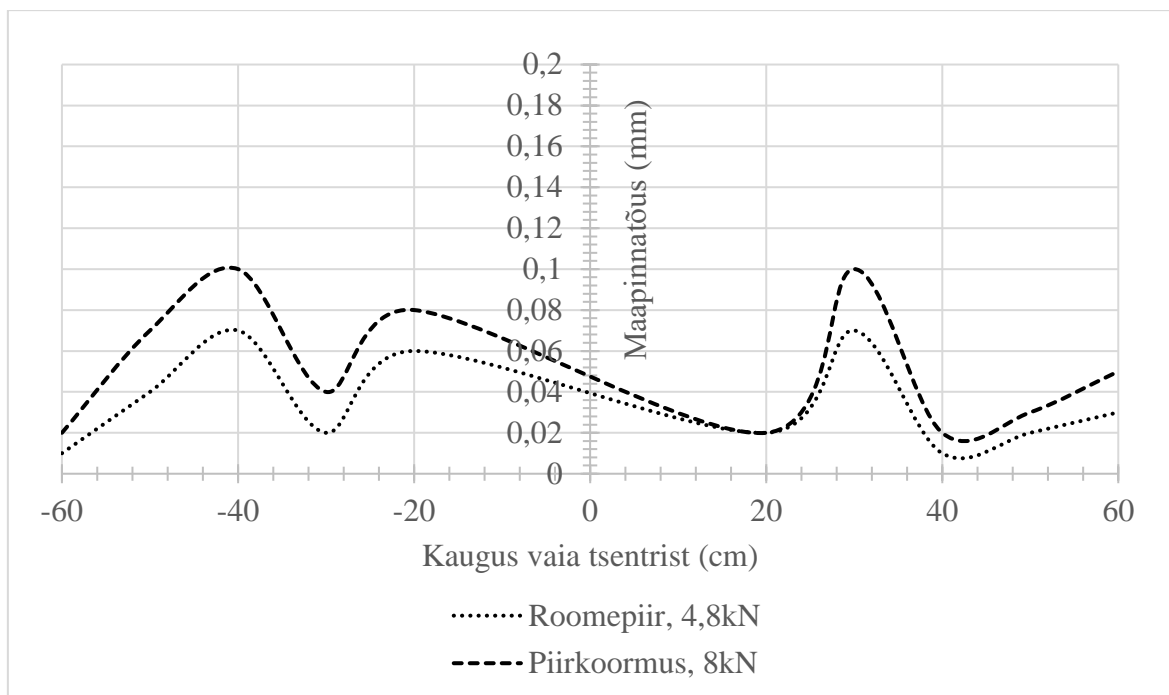
**Tabel 2.21.** 75-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia rammimise vaste

Jrk nr	Siire (mm)	
	vai nr 1	vai nr 2
1	11	11
2	11	10,5
3	10,5	10

**Tabel 2.22.** 75-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	1	0,09
2	2	1,05
3	3	2,38
4	4	3,49
5	5	4,79
6	6	6,48
7	7	9,85
8	8	24,93

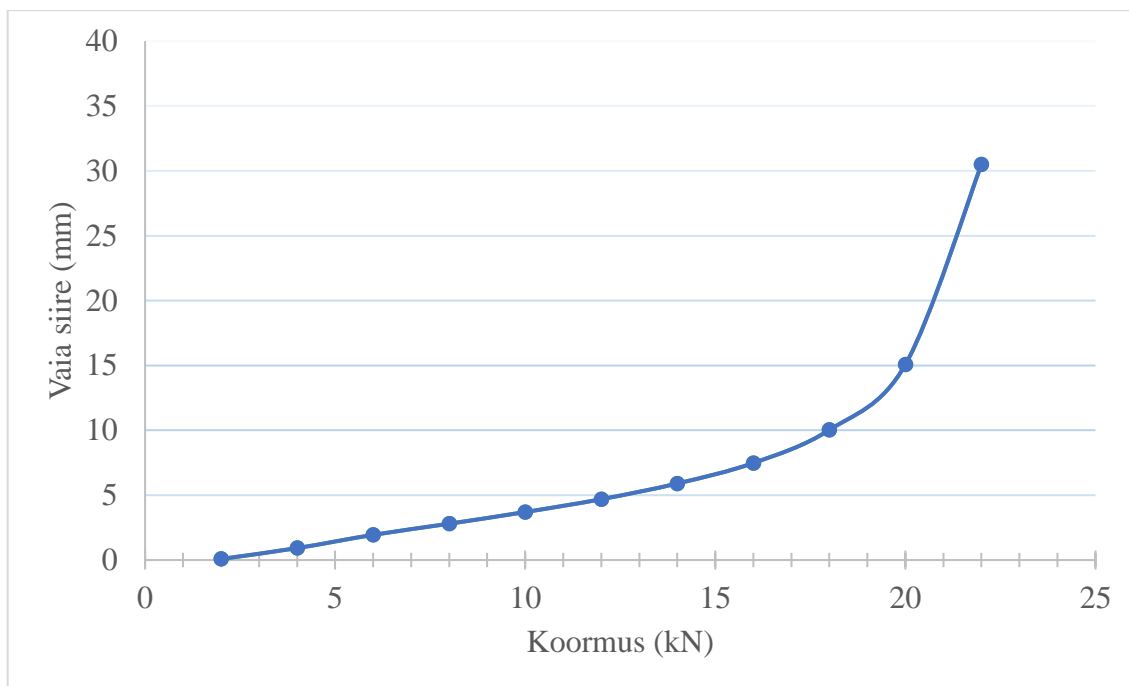
**Joonis 2.21.** 75-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormusgraafik



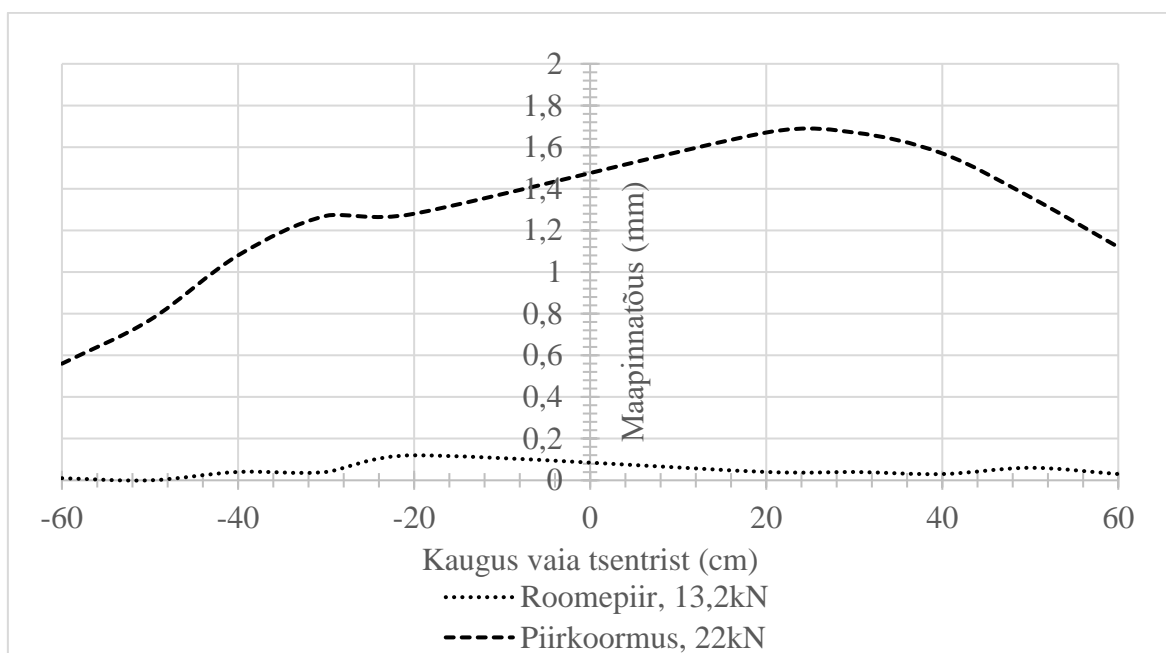
**Joonis 2.22.** 75-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.23.** 75-kraadise 50mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	2	0,08
2	4	0,92
3	6	1,94
4	8	2,8
5	10	3,7
6	12	4,69
7	14	5,9
8	16	7,48
9	18	10,03
10	20	15,07
11	22	30,5



**Joonis 2.23.** 75-kraadise 50mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik



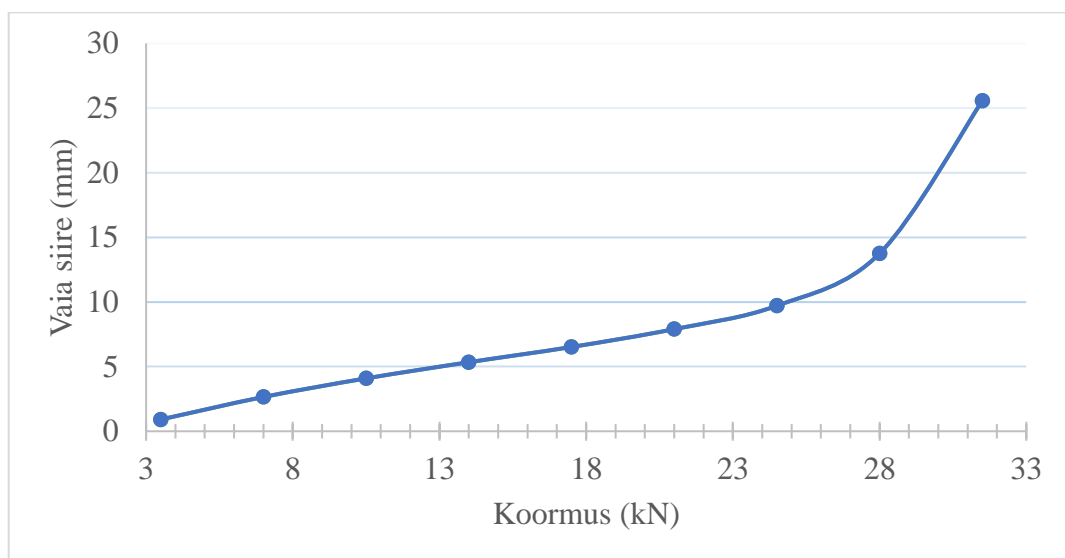
**Joonis 2.24.** 75-kraadise 50mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.24.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) väändemomendid

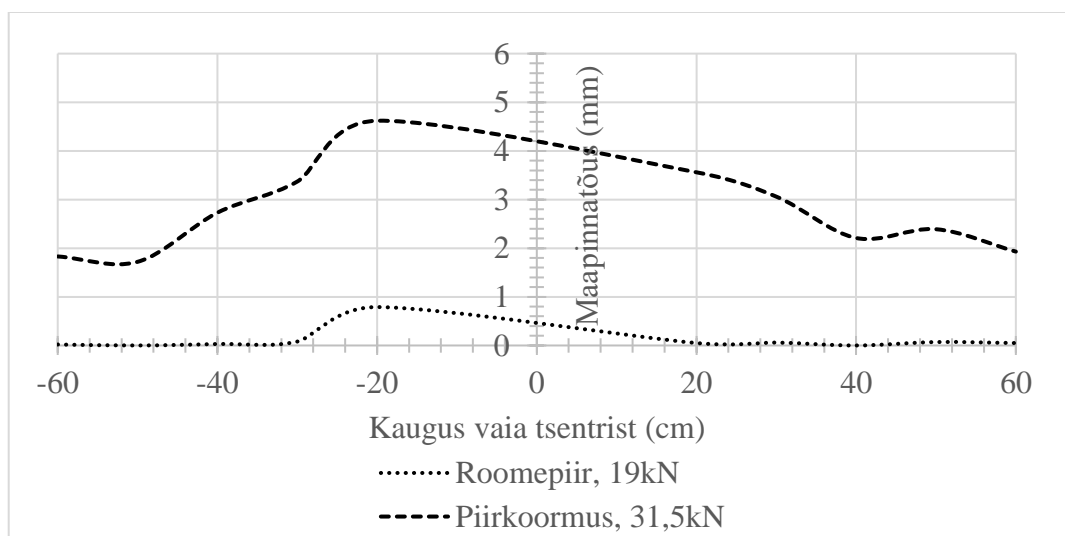
Jrk nr	Väändemoment (Nm)	
	vai nr 1	vai nr 2
1	230	260
2	260	290
3	250	320

**Tabel 2.25.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	3,5	0,91
2	7	2,65
3	10,5	4,09
4	14	5,34
5	17,5	6,52
6	21	7,9
7	24,5	9,71
8	28	13,75
9	31,5	25,56



**Joonis 2.25.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik



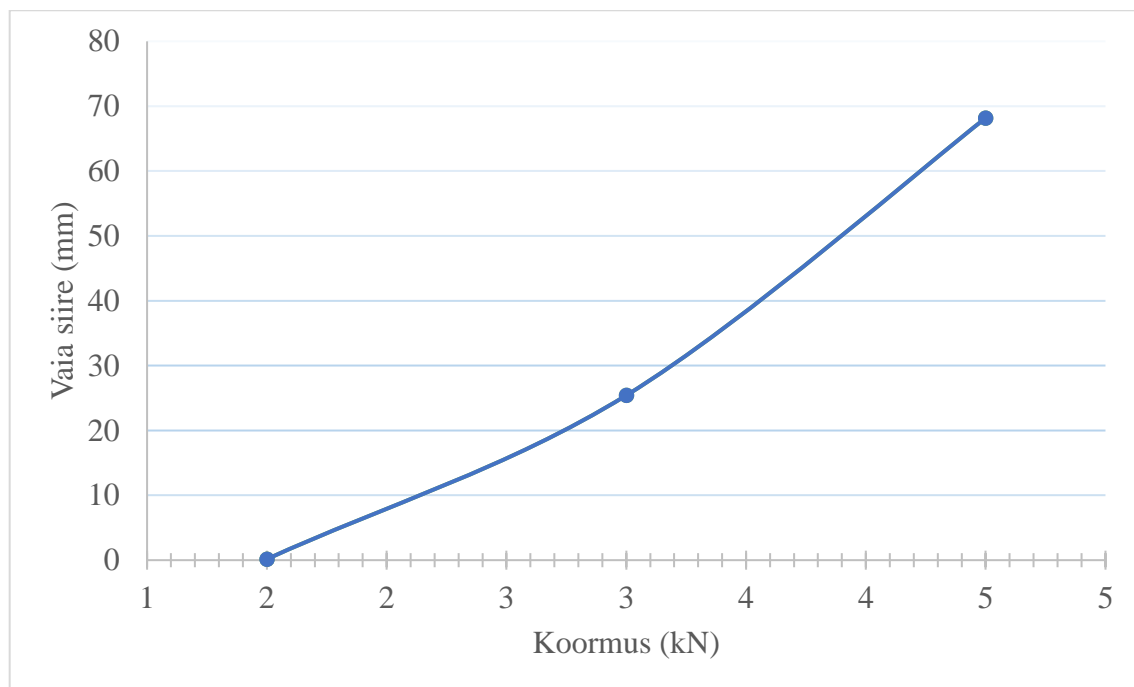
**Joonis 2.26.** 75-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse maapinna tõus

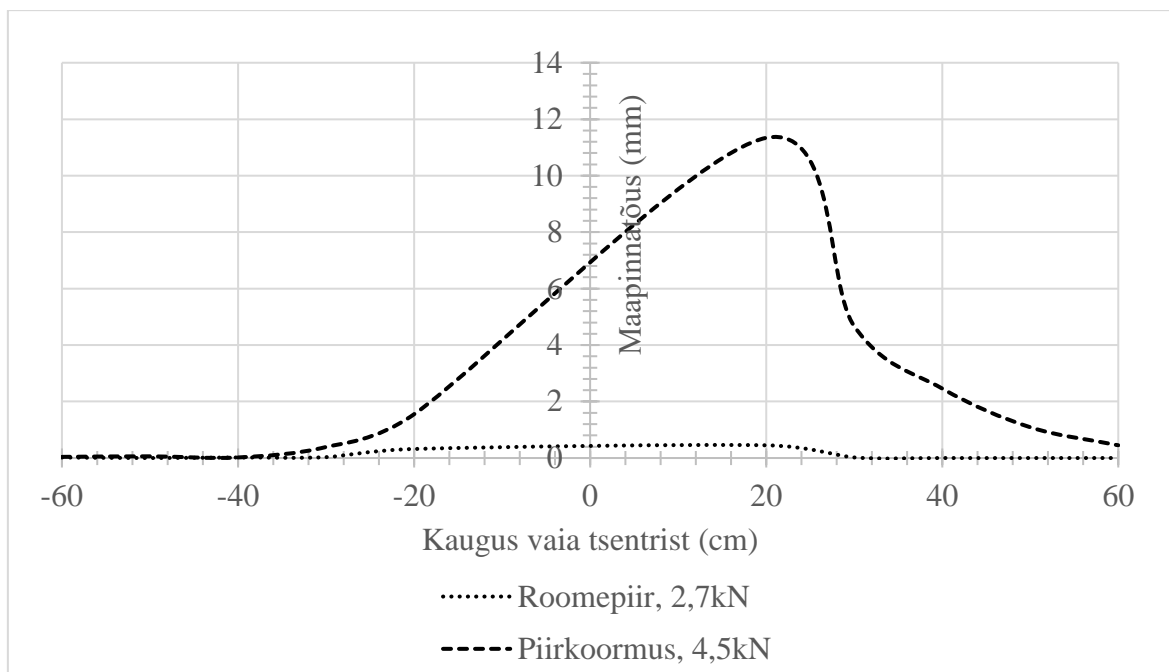
**Tabel 2.26.** 60-kraadise kahe sileda vaia rammimise vasted

Jrk nr	Siire (mm)	
	vasak	parem
1	11,5	11
2	10	10
3	10,5	10

**Tabel 2.27.** 60-kraadise kahe sileda vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	1,5	0,16
2	3	25,41
3	4,5	68,17

**Joonis 2.27.** 60-kraadise kahe sileda vaia tõmbekatse koormusgraafik



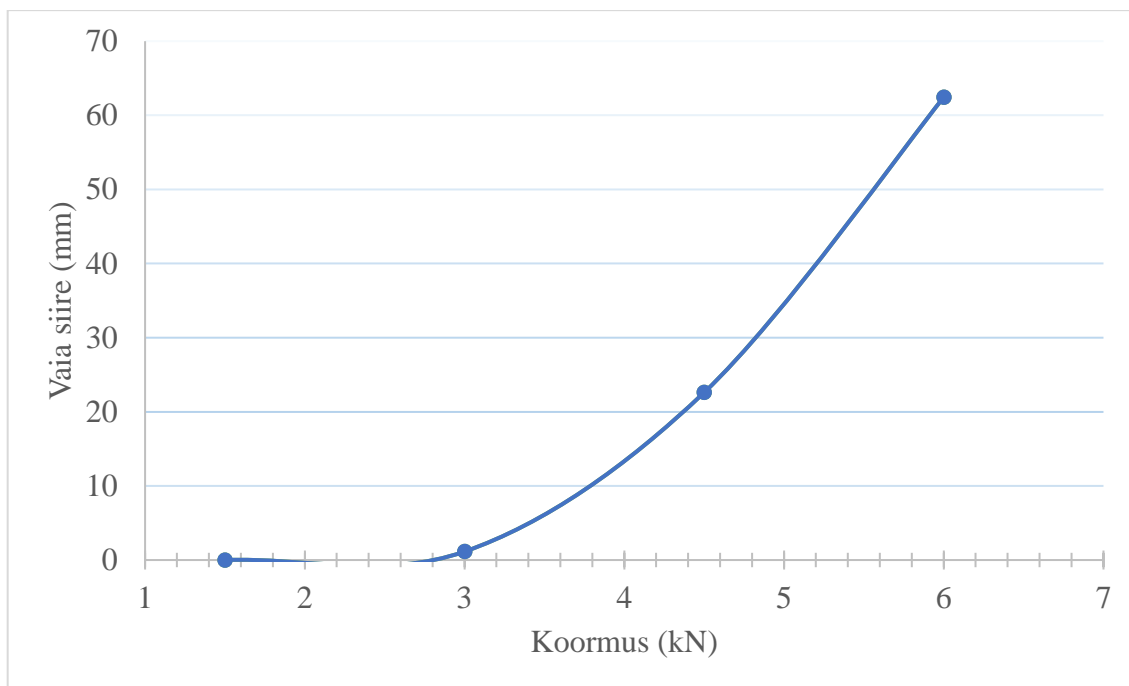
**Joonis 2.28.** 60-kraadise kahe sileda vaia tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.28.** 60-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia rammimise vasted

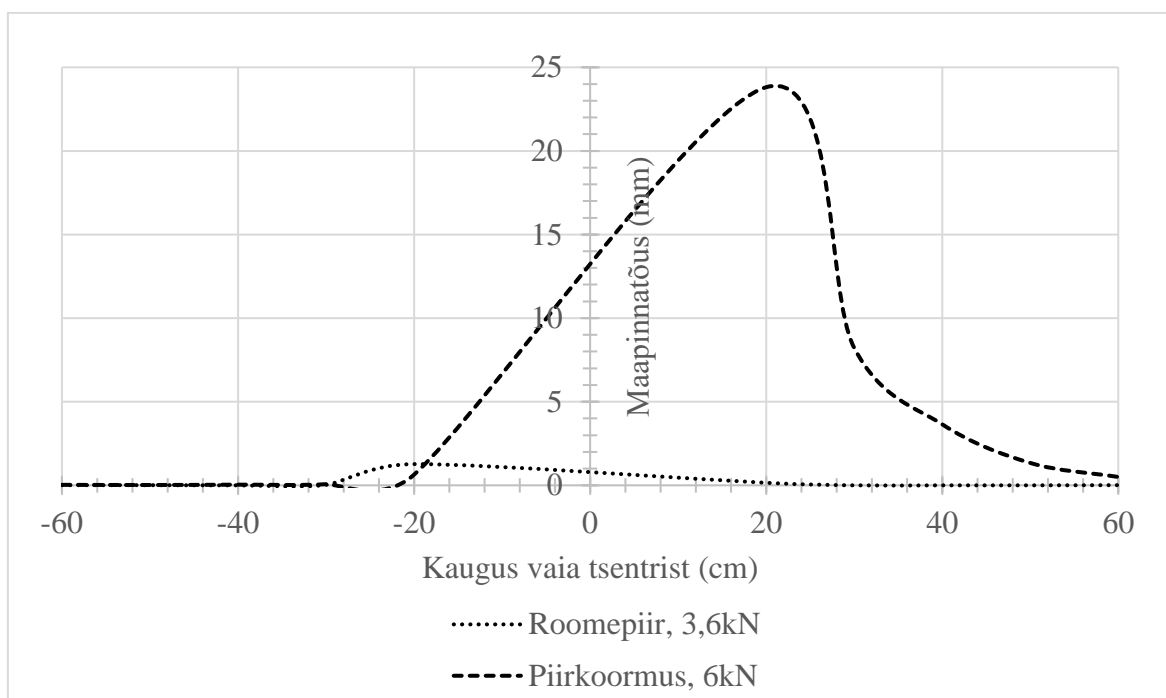
Jrk nr	Siire (mm)	
	vai nr 1	vai nr 2
1	12	10,5
2	11,5	10,5
3	10	9

**Tabel 2.29.** 60-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	1,5	0
2	3	1,14
3	4,5	22,6
4	6	62,43



**Joonis 2.29.** 60-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia tõmbekatse koormusgraafik



**Joonis 2.30.** 60-kraadise kahe ribilise pinnaga vaia tõmbekatse maapinna tõus

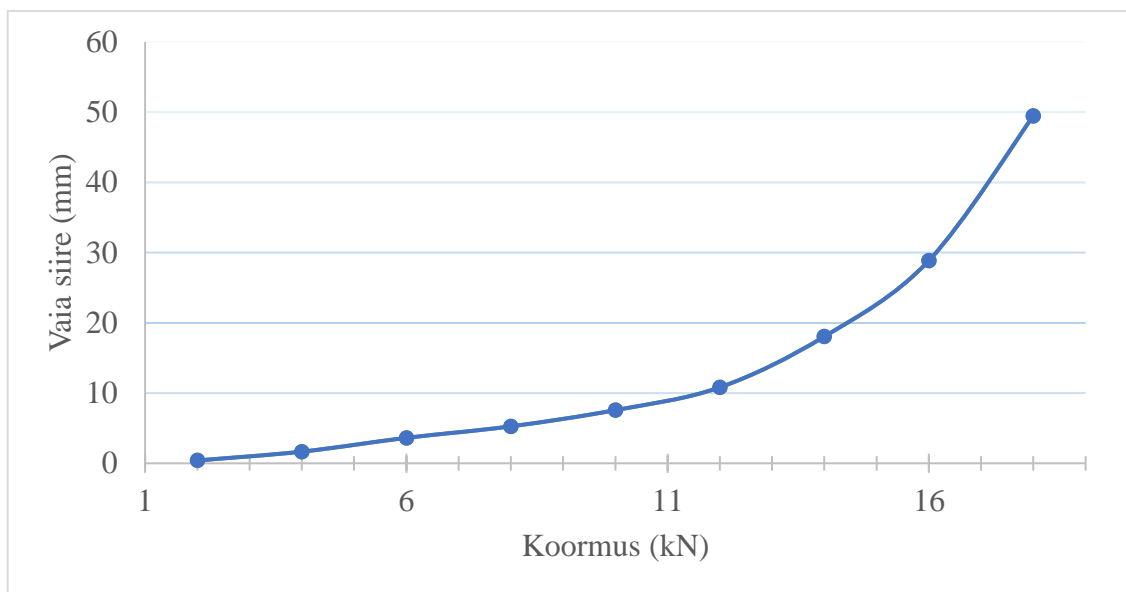
**Tabel 2.30.** 60-kraadise 50mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
A	1	2
1	2	0,4
2	4	1,66
3	6	3,62

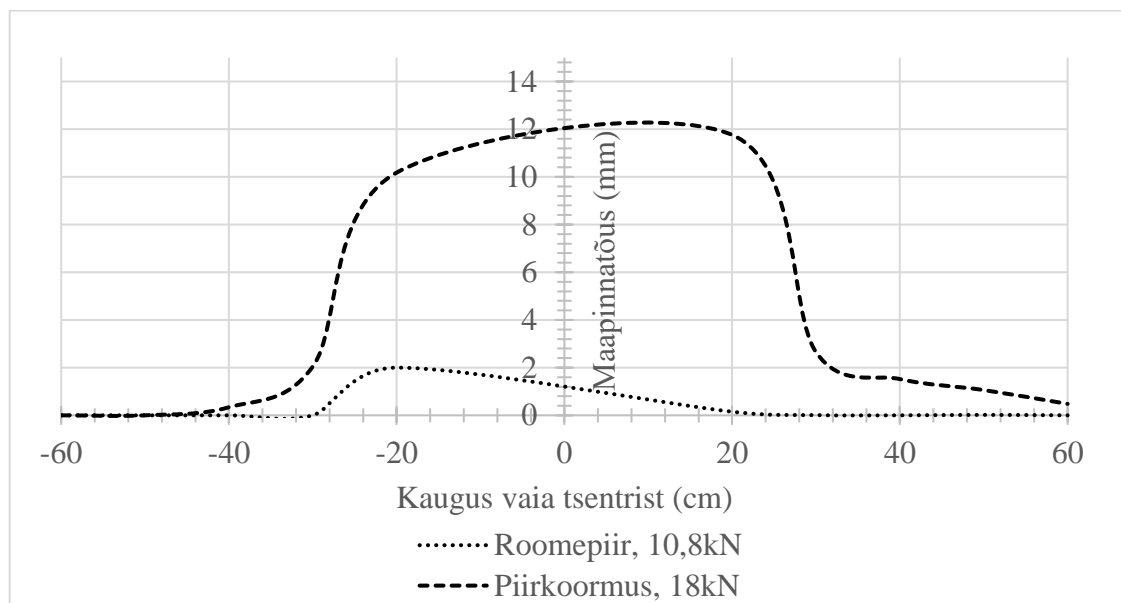


Tabeli 2.30 järg

A	1	2
4	8	5,26
5	10	7,57
6	12	10,82
7	14	18,05
8	16	28,86
9	18	49,48



**Joonis 2.31.** 60-kraadise 50mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik



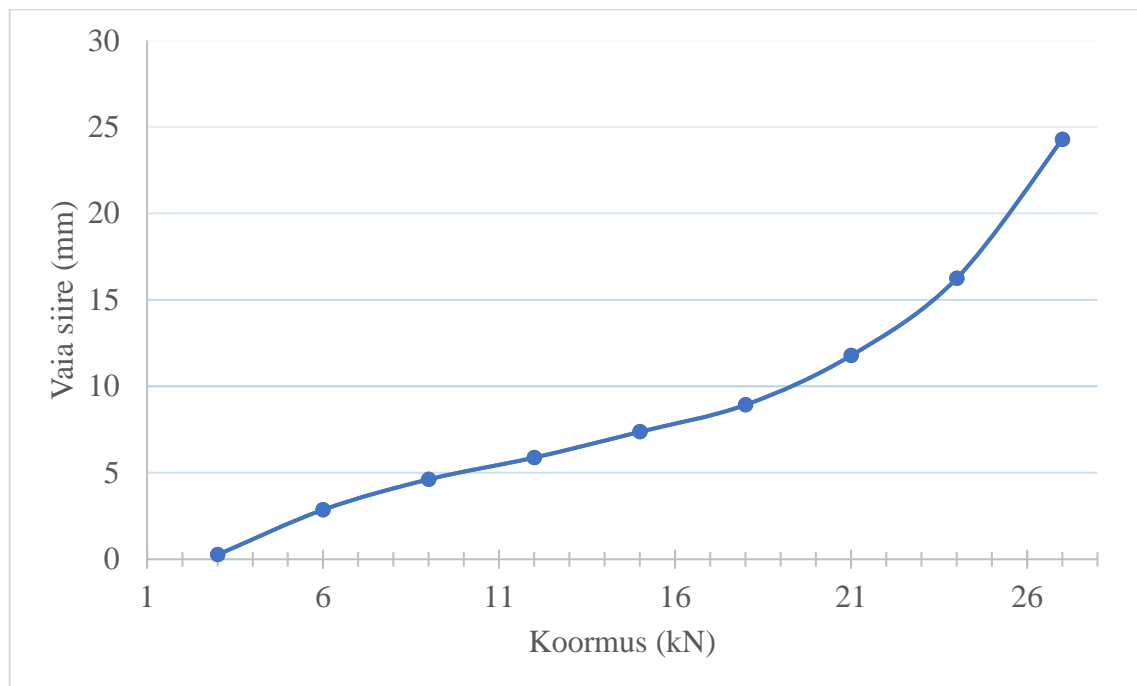
**Joonis 2.32.** 60-kraadise 50mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse maapinna tõus

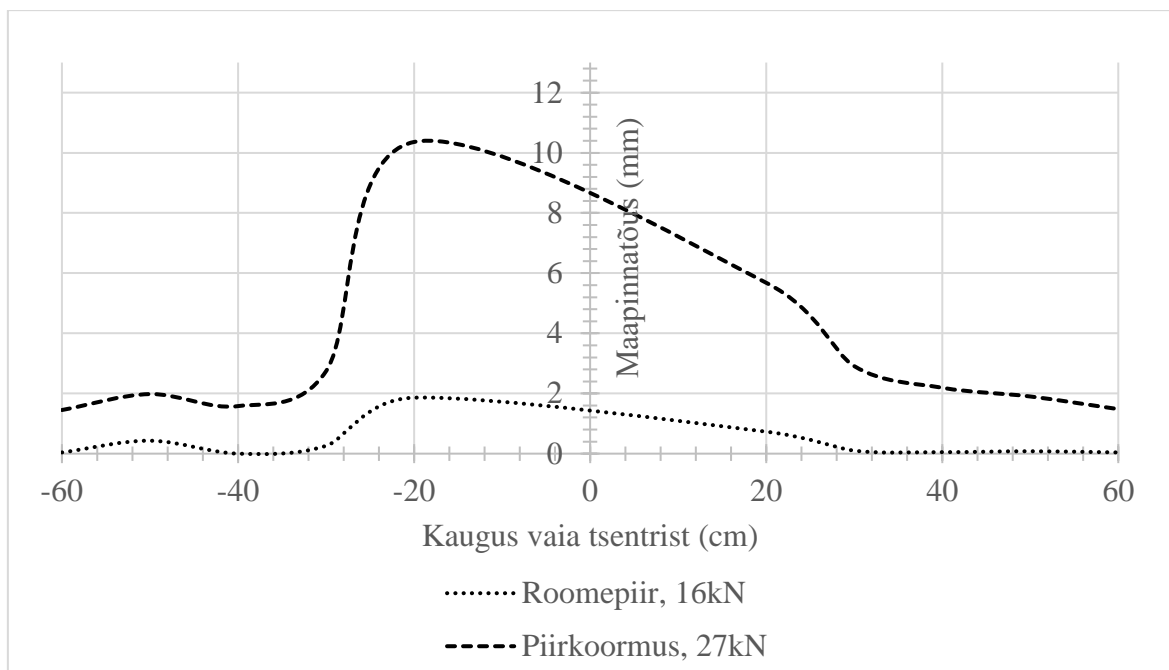
**Tabel 2.31.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) väändemomendid

Jrk nr	Väändemoment (Nm)	
	vasak	parem
1	200	190
2	180	230
3	190	260

**Tabel 2.32.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	3	0,26
2	6	2,86
3	9	4,62
4	12	5,88
5	15	7,37
6	18	8,93
7	21	11,78
8	24	16,24
9	27	24,28

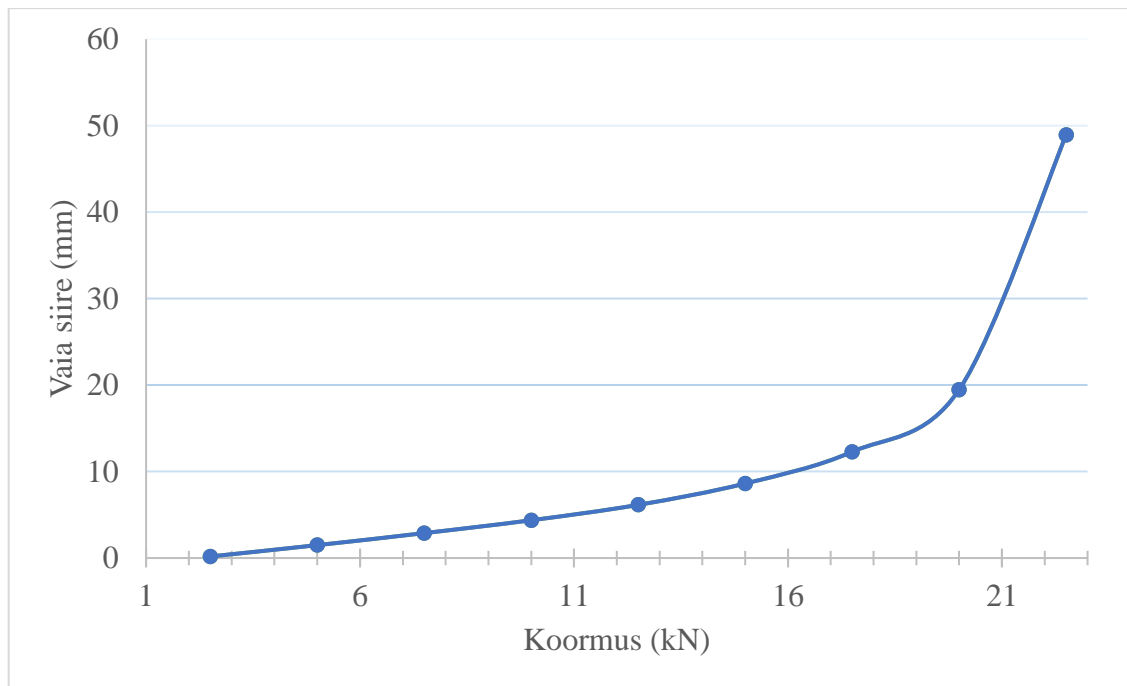
**Joonis 2.33.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik



**Joonis 2.34.** 60-kraadise 100mm labaga kruvivaia (2tk) tõmbekatse maapinna tõus

**Tabel 2.33.** 50mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel, vaiade vahekaugus 400mm

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	2,5	0,18
2	5	1,49
3	7,5	2,88
4	10	4,37
5	12,5	6,15
6	15	8,62
7	17,5	12,29
8	20	19,47
9	22,5	48,92



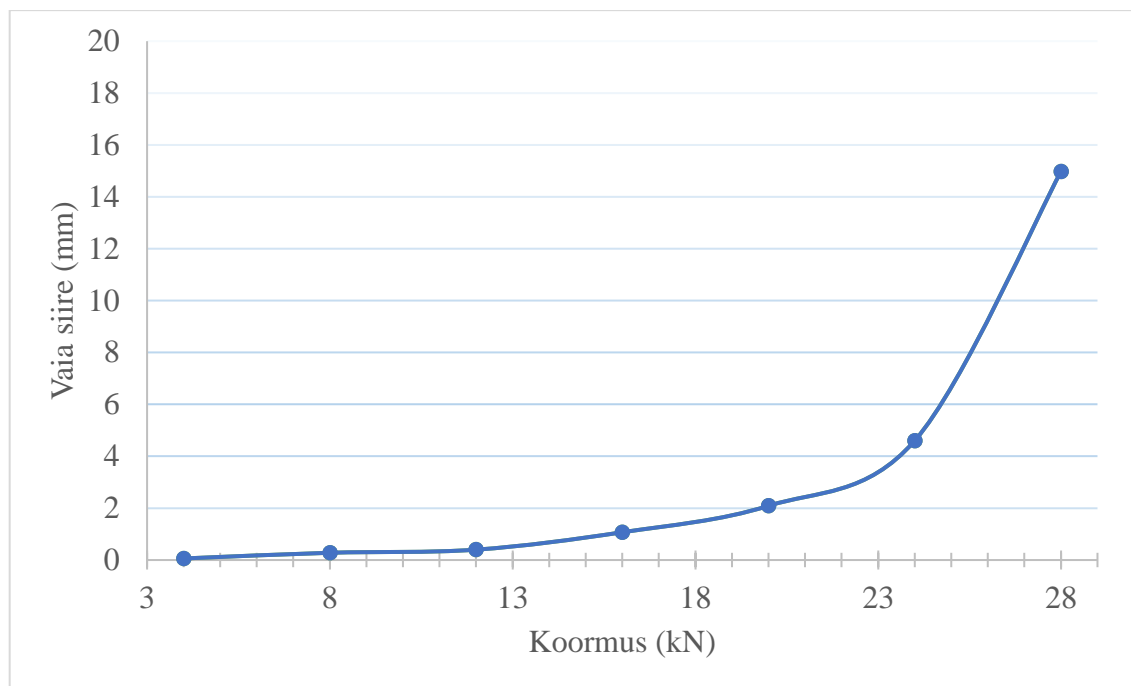
**Joonis 2.35.** 50 mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik, vaiade vahekaugus 400mm

**Tabel 2.34.** 100mm labaga kruvivaia vertikaalse (2tk) väändemomendid, vaiade vahekaugus 400mm

Jrk nr	Väändemoment (Nm)	
	vai nr 1	vai nr 2
1	240	200
2	220	240
3	200	230

**Tabel 2.35.** 100mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel, vaiade vahekaugus 400mm

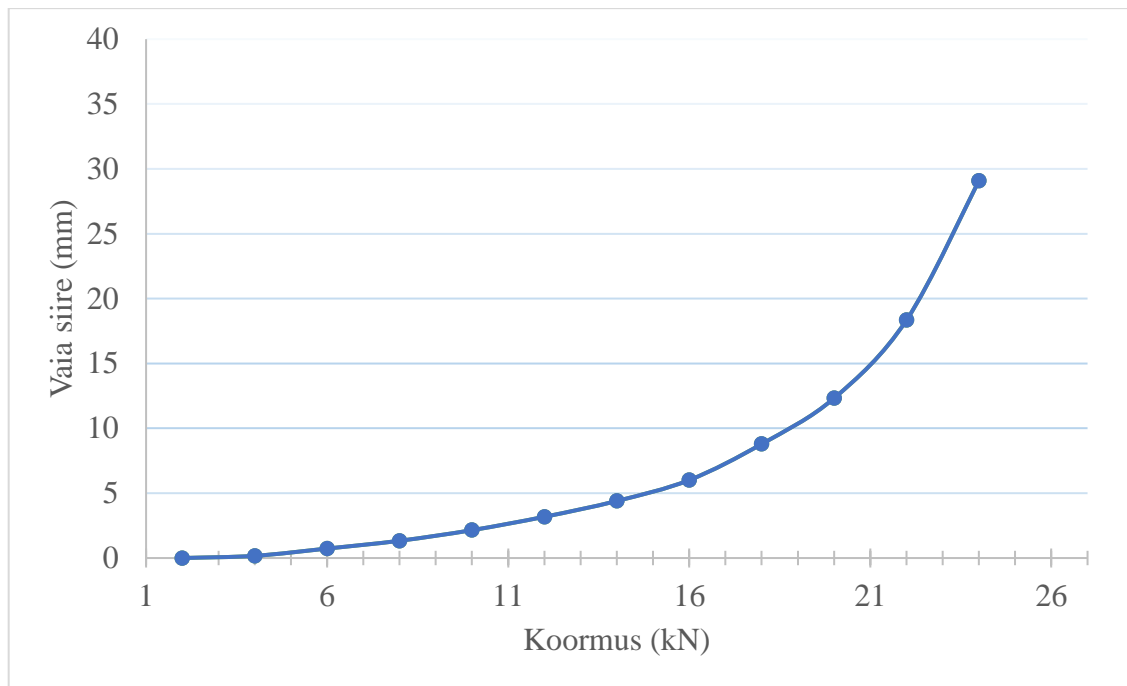
Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	4	0,06
2	8	0,28
3	12	0,4
4	16	1,07
5	20	2,09
6	24	4,6
7	28	14,97



**Joonis 2.36.** 100mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik, vaiade vahekaugus 400mm

**Tabel 2.36.** 50mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel, vaiade vahekaugus 800mm

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	2	0
2	4	0,17
3	6	0,73
4	8	1,33
5	10	2,15
6	12	3,18
7	14	4,4
8	16	6,01
9	18	8,79
10	20	12,32
11	22	18,34
12	24	29,09
13	26	51,13



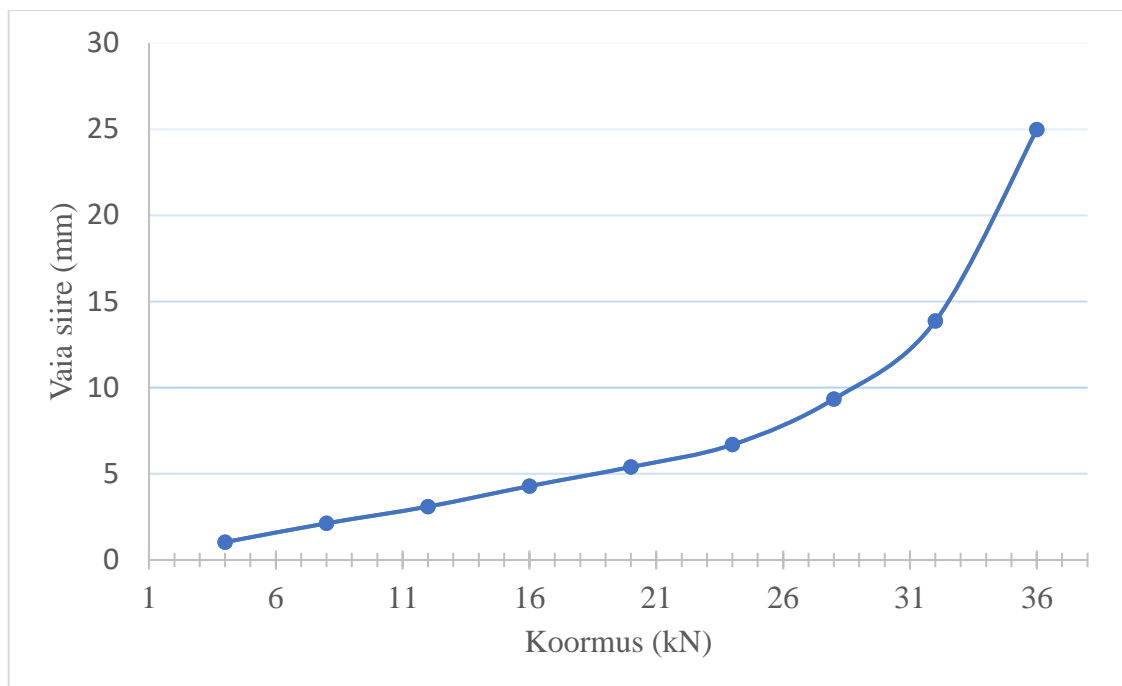
**Joonis 2.37.** 50mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik, vaiade vahekaugus 800mm

**Tabel 2.37.** 100mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) väändemomendid, vaiade vahekaugus 800mm

Jrk nr	Väändemoment (Nm)	
	vai nr 1	vai nr 2
1	200	260
2	230	270
3	260	280

**Tabel 2.38.** 100mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormustabel, vaiade vahekaugus 800mm

Koormusaste	Koormus(kN)	Siire(mm)
1	4	1,04
2	8	2,13
3	12	3,1
4	16	4,29
5	20	5,4
6	24	6,69
7	28	9,34
8	32	13,86
9	36	24,98



**Joonis 2.38.** 100mm labaga vertikaalse kruvivaia (2tk) tõmbekatse koormusgraafik, vaiade vahekaugus 800mm

### Lisa 3. Pinnaseproovid

**Tabel 3.1.** Pinnaseproovid, võetud 6. & 7. katse vahel

Proovi sügavus maapinnast, m	Topsi nr	Tühja topsi kaal, g	Kaal koos topsiga, g	Pinnase kaal ilma topsita, g	Topsi ruumala, l	Niiskus w, %	Tihedus g/cm <sup>3</sup>
0,7	1	28	152	124	0,075	10,5	1,65
0,4	2	25	150	125	0,075	7,2	1,66
0,1	3	27	152	125	0,075	6,4	1,66
0,7	1a	28	139	111	0,075	-	1,48
0,4	2a	27	143	116	0,075	-	1,54
0,1	3a	28	145	117	0,075	-	1,56

**Tabel 3.2.** Pinnaseproovid, võetud 13. & 14. katse vahel

Proovi sügavus maapinnast, m	Topsi nr	Tühja topsi kaal, g	Kaal koos topsiga, g	Pinnase kaal ilma topsita, g	Topsi ruumala, l	Niiskus w, %	Tihedus g/cm <sup>3</sup>
0,7	1	28	153	125	0,075	10,4	1,66
0,4	2	25	153	128	0,075	12	1,71
0,1	3	27	154	127	0,075	9,4	1,69
0,7	1a	28	140	112	0,075	-	1,49
0,4	2a	27	143	116	0,075	-	1,55
0,1	3a	28	143	115	0,075	-	1,53



**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Kristo Karu,  
(sünnipäev 05.08.1992)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö:  
Kaldu süvistatud teras- ja kruvivaiade käitumine ja tõmbekandevõime,  
mille juhendajad on Villu Leppik, Mait Mets

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 22.05.2017

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)